



Rôle de la vapeur d'eau atmosphérique dans la régulation du système climatique: étude des zones tropicales

Hélène Brogniez

► To cite this version:

Hélène Brogniez. Rôle de la vapeur d'eau atmosphérique dans la régulation du système climatique: étude des zones tropicales. Océan, Atmosphère. Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (UVSQ), France, 2016. tel-01380213

HAL Id: tel-01380213

<https://hal.science/tel-01380213>

Submitted on 12 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à Diriger des Recherches / *Accreditation to Direct Research*

HELENE BROGNIEZ

Rôle de la vapeur d'eau atmosphérique dans la régulation du système climatique : étude des zones tropicales

On the role of atmospheric water vapor in the regulation of climate: studies over the tropical regions

Soutenue le 23 juin 2016

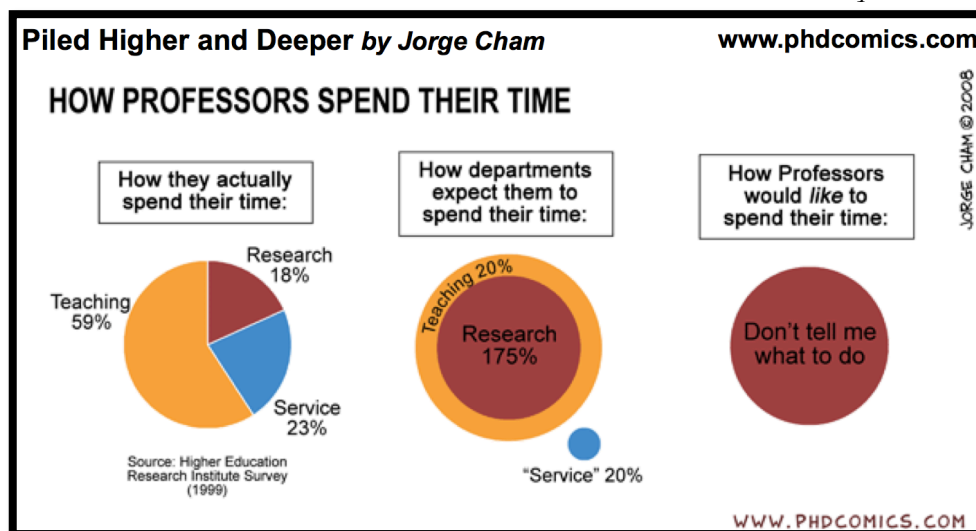
Devant le jury composé de

M. Philippe Bousquet, LSCE, Université de Versailles St Quentin,
Mme Nathalie Huret, LPC2E, Université d'Orléans
Mr Jörg Schulz, EUMETSAT
Mr Frédéric Parol, LOA, Université de Lille 1
Mme Hélène Chepfer, LMD, Université Pierre et Marie Curie
Mr Frank Roux, LA, Université Paul Sabatier
Mr Jean-François Mahfouf, CNRM, Météo-France
Mr Jean-Philippe Lafore, CNRM, Météo-France

Président du Jury
Rapporteuse
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Examineur
Invité

TABLE DES MATIERES

Trois visions d'un même métier : quel est le bon équilibre ?



I. Curriculum Vitae.....	3
II. Activités d'enseignement.....	7
III. Communications Scientifiques.....	8
IV. Dossier de recherche	
1) Introduction.....	14
a) Vapeur d'eau et Rayonnement.....	15
b) Vapeur d'eau et Température.....	18
c) Place dans le climat	19
2) Synthèse des travaux	21
a) Développement de méthodes d'interprétation pour les canaux passifs « Vapeur d'eau »	21
b) Analyse des variations spatiales et temporelles de l'humidité troposphérique.....	31
3) Perspectives scientifiques.....	37
a) Concernant l'observation de la vapeur d'eau.....	37
b) Concernant l'analyse de processus.....	40
Liste des acronymes.....	47
Références bibliographiques.....	49

Mots-clefs : Vapeur d'eau troposphérique ; Radiométrie micro-ondes & infra-rouge ; Méthodes d'inversion ; Variabilité spatio-temporelle ; Transport de grande échelle et processus locaux

I. CURRICULUM VITAE

1) EMPLOIS ACADEMIQUES

- **Oct. 2006 – présent : Maître de Conférence** à l'Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines, au Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales, dans l'équipe « Statistiques, Processus, Atmosphère et Cycle de l'Eau » :
- **Nov. 2004 – Sept. 2006 : Research associate** avec R. Pierrehumbert au « Climate System Center », Département de Sciences Géophysiques de l'Université de Chicago, USA.
- **Sept. 2001 – Août 2004 : Monitrice** à l'UFR 924 de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), affectée à la formation IFITEP (*Institut de Formation d'Ingénieurs en Techniques Electroniques de Paris*)

2) FORMATION & DIPLOMES

- **Sept. 2001 – Nov. 2004 : Doctorat en Sciences**, spécialité **Méthodes Physiques en Télédétection** en tant qu'allocataire de recherche au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, CNRS/UPMC/ENS/X), Mention très honorable. Sujet de thèse : « Humidité de la troposphère libre africaine : Elaboration d'une archive METEOSAT, analyse climatique et évaluation de modèles », sous la direction de L. Picon et R. Roca, soutenue le 19 novembre 2004.
- **2000-2001 : DEA** de « Méthodes physiques en Télédétection » de l'UPMC, mention bien. Mémoire de DEA sur l'exploitation des observations à 6,3 μm de METEOSAT, (sous la direction de R. Roca, LMD/X).
- **1999-2000 : Maîtrise de Physique** à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), mention bien.
- **1998-1999 : Licence de Physique** à l'USTL, mention assez bien.
- **1996-1998: DEUG de Sciences et Technologies**, option Sciences de la Matière à l'USTL, mention assez bien.

3) (CO-) ENCADREMENTS – POST-DOCS, DOCS & STAGES

Encadrements d'ingénieurs & vacataires

	PROJET
Christophe Dufour (IE permanent, LATMOS, recruté en 2011)	<u>Megha-Tropiques</u> : exploitation et maintien des algorithmes d'estimations des produits géophysiques « vapeur d'eau » et « précipitations », lien avec le CGTD ICARE (co-encadrement N. Viltard, LATMOS, produits « précipitations »).
Renaud Fallourd (IR CNES, LATMOS, 2014-présent)	<u>Megha-Tropiques</u> : validation et analyse des produits géophysiques « vapeur d'eau » à l'aide de mesures in-situ, signature des nuages.
Thomas Laveille (vacataire INSU, LATMOS, février-juin 2014)	<u>Megha-Tropiques</u> : analyse de la signature des nuages dans les produits géophysiques « vapeur d'eau ».
Gaëlle Clain (IR CNES, LATMOS, 2012-2014)	<u>Megha-Tropiques</u> : validation de l'étalonnage de SAPHIR à l'aide de mesures in-situ.

Francis Marquisseau (IE CNES, LATMOS, 2010-2011)	<u>Megha-Tropiques</u> : préparation de la chaîne de traitement pour la génération des produits géophysiques « vapeur d'eau », lien avec le CGTD ICARE.
Joke Meijer-Pofana (IE contrat CM-SAF/LMD, 2010-2011, co-encadrée avec R. Roca & L. Picon)	<u>METEOSAT</u> : Homogénéisation et intercalibration des observations issues des Meteosat successifs sur la période 1983-2009, lien avec le CM-SAF.
Nicolas Gif (IE contrat CM-SAF/LMD, 2008-2009, co-encadré avec R. Roca & L. Picon)	<u>METEOSAT</u> : Adaptation d'un algorithme « recherche » d'estimation de l'humidité troposphérique pour l'imageur SEVIRI de Meteosat Seconde Génération, homogénéisation des différents imageurs, lien avec le CM-SAF.

(Co-) Encadrements de doctorants

- Peter Sinigoj (UPMC, octobre 2014 - présent, encadrement 40%, co-direction 60% L. Picon - LMD) : Analyse à l'échelle climatique de la distribution de la vapeur d'eau troposphérique tropicale et évaluation de modèles de climat.

Bourse doctorale de l'ED des Sciences de l'Environnement d'Ile de France.

- Thomas Garot (UVSQ, octobre 2013 - présent, encadrement 50%, co-direction 50% N. Viltard - LATMOS) : Relations convection-environnement dans la troposphère tropicale, utilisation de Megha-Tropiques.

Bourse doctorale de l'ED des Sciences de l'Environnement d'Ile de France.

- Ramsès Sivira (UPMC, octobre 2010 - décembre 2013, encadrement 75%, co-direction 25% C. Mallet - LATMOS) : Elaboration d'un algorithme de restitution des profils d'humidité relative associés aux fonctions de densité de probabilité de l'erreur conditionnelle.

Bourse doctorale de l'ED des Sciences de l'Environnement d'Ile de France.

Emploi actuel : Ingénieur traitement de données chez MeteoProtect SA depuis décembre 2014.

Encadrements d'étudiants de Masters 1 & 2

- Julien Perraud (M2 UVSQ, avril - juillet 2015) : Variabilité du climat tropical - les vagues de chaleur au Sahel en lien avec la dynamique de grande échelle
- Ismaila Diallo (M1 UVSQ, mai - juin 2015) : Transfert Radiatif - asymétrie de la raie d'absorption à 183GHz
- Vincent Nouchi (M2 UVSQ, collaboration avec l'IIS, Inde, mars - septembre 2012) : Variabilité du climat tropical - descente d'échelle des mesures de précipitations au-dessus de l'Inde
- Ramsès Sivira (M2 UVSQ, avril-juillet 2010) : Algorithmie - restitution de profils d'humidité relative à partir d'observations micro-ondes.
- Rodrigo Guzman (M2 UPMC, mars-juin 2009) : Variabilité du climat tropical - relations entre OLR et humidité troposphérique
- Clémentine Junquas (M2 UPMC, mars-juin 2008) : Variabilité du climat tropical - rétroaction de la vapeur d'eau dans les régions tropicales
- Audrey Gaudel & Nicolas Turpin (M1 UPMC, avril-juin 2008) : Transfert Radiatif - évaluation des mesures d'un radiomètre microonde.
- Cyndie Lemaître (M2 UVSQ, mars-juin 2007) : Variabilité du climat tropical - relations convection-humidité troposphérique

4) PROJETS & RESPONSABILITES

Projets nationaux et internationaux

- Membre du groupe de travail du CNES sur l'expression des besoins pour l'observation de la vapeur d'eau, prospective à l'horizon 2025 (démarrage de la phase 0 en octobre 2015). Ecriture du « User Requirement Document » à destination du CNES.
- Co-proposante projet ESA-Geosounder « Requirements consolidation study » (ESA IT, PI : P. Chambon, CNRM/GAME, et R. Roca, CNRS/LEGOS)
- Co-proposante projet DYCECT « DYnamique, énergie et Cycle de l'Eau dans la Convection Tropicale » (prospective CNES 2014, PI : N. Viltard, CNRS/LATMOS)
- Co-proposante projet LiVE « Un Lidar Vapeur d'Eau pour le M-Train » (prospective CNES 2014, PI : C. Flamant, CNRS/LATMOS)
- Participante à l'ANR ACASIS « Alerte aux Canicules au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé » (PI : S. Janicot, IRD/LOCEAN, financement 2014-2018).
- Participante au Groupement de Recherche « Megha-Tropiques » (PI : R. Roca CNRS/LEGOS, démarrage en février 2014).
- Participante du groupe de travail international X-CAL (Intercalibration des radiomètres microondes, mission GPM – Global Precipitation Measurement, NASA/JAXA), avec des workshops en 2013 & 2014.
- Participante au Groupement de Recherche « Radiométrie Microonde pour l'étude de l'atmosphère » (PI : C. Prigent CNRS/LERMA, démarrage en avril 2008).
- Co-proposante du projet de contribution française à la campagne d'étude de l'oscillation de Madden-Julian CINDY-DYNAMO (profils de vapeur d'eau) couvrant la période octobre 2011 - mars 2012 dans l'Océan Indien (PI : J-P Duvel, LMD).
- Porteur d'un projet IPSL, financé en 2013 « International workshop on advances in observations, models and measurements techniques of atmospheric water vapor isotopes » ayant pour objet l'organisation d'un atelier international sur les isotopes de la vapeur d'eau (projet LATMOS, LSCE).
- Co-porteur scientifique d'un projet IPSL financé en 2009 « Vapeur d'eau atmosphérique : développements instrumentaux, validations et tendances » ayant pour objectifs l'exploitation des différents instruments du SIRTa et de l'OHP (dédiés à la mesure de la vapeur d'eau) lors des campagnes HyMex et Megha-Tropiques (projet LATMOS, LMD, IPSL. PI : A. Sarkissian).
- Porteur scientifique d'un projet IPSL financé en 2007 « Analyse de la distribution de l'humidité de la troposphérique autour des systèmes convectifs et étude des interactions nuages – vapeur d'eau » (projet CETP, LMD + collaboration Univ. Chicago).

Responsabilités scientifiques & académiques

Internationales

- Membre du groupe de travail Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) - Water Vapor Assessment (VAP) initié par le World Climate Research Program (WCRP) en 2011. Le rapport est en cours de rédaction pour un rendu à l'automne 2016.
- Membre du comité d'utilisateurs du projet Horizon 2020 « GAIA-CLIM » (Gap Analysis for Integrated Atmospheric ECV -Essential Climate Variable- CLimate Monitoring) qui a démarré en 2015.
- Reviewer de 2 projets pour la National Science Foundation (2009, 2013)
- Reviewer pour: Journal of Climate, Atmospheric Chemistry and Physics, Journal of Geophysical Research-Atmosphere, Radio Science, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Atmospheric Science Letters, Climate Dynamics, Surveys in Geophysics, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium

Nationales

- Membre élu du Conseil National des Universités, section 37 « Météorologie, Océanographie, Physique de l'Environnement » (2015 - présent)
- Membre du comité scientifique de l'action IMAGO (« Interactions Multiples dans l'Atmosphère, la Glace et l'Océan ») du programme LEFE du CNRS (2011-présent)
- Membre du comité utilisateurs du pôle thématique ICARE (2010-2014)
- Membre du comité « formations » du labex L-IPSL (2012-2014)
- Membre du comité d'attribution de la prime d'excellence scientifique de l'UVSQ (sections 34/35/37) (2010-2012)
- Membre de la commission de spécialistes de l'UVSQ (sections 34-37) (années 2007 & 2008)

Organisation d'ateliers

- Co-organisatrice de l'atelier international « Joint workshop on uncertainties at 183GHz », organisé du 29 au 30 juin 2015, à Paris (LATMOS/Météo-France/ECMWF/IPSL).
- Co-organisatrice de l'atelier « First international workshop on advances in observations, models and measurements techniques of atmospheric water vapor isotopes », organisé du 16 au 18 octobre 2013, à Gif-sur-Yvette (LSCE/LATMOS/CNRS/IPSL).
- Co-organisatrice de l'atelier de clôture de l'action COST « Water Vapor in the Climate System » (WaVaCS), organisé du 26 au 28 septembre 2011 à l'ENS-Paris.

5) AUTRES INFORMATIONS

- Prime d'excellence scientifique, UVSQ, section 34/35/37 (période 2011-2015)
- Congé pour recherche, CNU section 37, 2014-2015 (6 mois) : Obtenu pour le passage à l'exploitation scientifique des observations Megha-Tropiques, et l'amorçage d'études climatiques nouvelles.
- Délégation CNRS (section 19) 2009-2010 (6 mois) + renouvellement 2010-2011 (6 mois) : Obtenue suite à la prise de la responsabilité française de l'instrument SAPHIR du satellite Megha-Tropiques, et pour l'organisation de la campagne de validation de ses mesures.
- Congé pour recherche attribué par l'UVSQ (section 37) 2014-2015 (6 mois): Obtenue essentiellement pour l'exploitation scientifique de la mission Megha-Tropiques.
- Deux congés de maternité : années universitaires 2010-2011 & 2013-2014

II. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

1) RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES

- Master 1 « Sciences de l'Environnement » (2010 – 2015) : examen et sélection des dossiers de candidature, planification des emplois du temps et des examens, contenu pédagogique, jurys de semestres et de fin d'année.
- Licence « Physique-Chimie-Environnement » (2006-2011, devenue en 2010 un parcours de la licence de Physique) : emplois du temps, contenu pédagogique et jurys de fin d'année.
- Porteuse du projet d'Initiatives Pédagogiques « APAris-Saclay » (appel 2014-2015 pour l'année 2015-2016) : « Apprentissage par Pédagogie Active » de l'IDEX Paris-Saclay, incluant l'organisation d'une formation pour les enseignants-chercheurs dédiée aux méthodes de pédagogie active.

2) PANORAMA DES INTERVENTIONS

Niveau	Intitulé du module	Format (CM/TD/TP)	Période d'enseignement
Master 2	(Responsable) Observation de la Terre & des Nuages par Télédétection	CM & TD	2015 - présent
Master 2	(Responsable) Le système climatique (Partie : Rôle des nuages dans le climat)	CM & TD	2006 - 2015
Master 1	Dynamique de l'atmosphère et des océans (Partie : Océanographie Physique)	CM & TD	2011 - présent
Master 1	(Responsable) Transfert Radiatif	CM & TD	2006 - présent
Master 1	Thermique	CM	2015 - présent
Master 1	Fluides et Thermodynamique (Partie : Mécanique des fluides)	TD TP	2009-2012 2007-2009
Master 1	Informatique scientifique pour la physique et l'environnement	Projets tutorés	2010-2011
Master 1 (non scient.)	(Responsable) Sciences du climat & de l'Environnement	CM & TD (en anglais depuis sept 2015)	2007 - présent
Licence 3	Dynamique des enveloppes terrestres	CM & TD	2006 - 2014
Licence 2	Introduction à l'environnement terrestre	TP	2007 - 2010
Licence 1	Introduction à la thermodynamique et à la mécanique des fluides	TD	2011 - 2014
Licence 1	Mécanique du point	TD	2015 - présent
Licence 1	(Responsable) Observation de la Terre (Parties : Atmosphère, Effet de serre et Méthodes d'observation)	CM & TD	2006 - 2011
Licence 1	Sciences de l'ingénieur & Physique de l'Environnement (Partie : Physique de l'env.)	CM	2011-2012
Licence 1 (non scient.)	(Responsable) Océan, Atmosphère et Climat (Parties : Atmosphère et Climat)	CM, TD & TP	2006 - 2009
Licence 1	Optique & Electrocinétique	TD & TP	2006 - 2008

III. COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications dans des journaux de rang A

- (19) Garot T., **H. Brogniez**, R. Fallourd and N. Viltard : Large-scale versus local-scale influences on Upper-Tropospheric Humidity distribution : a study over the Indian Ocean during winter. *Subm to J. Appl. Meteor. Climatol.*, **juin 2016**
18. **Brogniez H.**, S. English, J-F Mahfouf, A. Behrendt, W. Berg, S. Boukabara, S. A. Buehler, P. Chambon, A. Gambacorta, A. Geer, W. Ingram, E. R. Kursinski, M. Matricardi, T. Odintsova, V. H. Payne, P. Thorne, M. Tretyakov and J. Wang: A review of sources of systematic errors and uncertainties in water vapor information derived from observations at 183GHz. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2207-2221, doi :10.5194/amt-9-2207-2016, **2016**.
17. **Brogniez H.**, R. Fallourd, C. Mallet, R. Sivira and C. Dufour: Estimating confidence intervals around relative humidity profiles from satellite observations: application to the SAPHIR sounder. *J. Atmos. Oc. Techn.*, 33 (5), 1005-1022, **2016**.
16. Roca R., **H. Brogniez**, P. Chambon, O. Chomette, S. Cloché, M. E. Gosset, J-F Mahfouf, P. Raberanto and N. Viltard: The Megha-Tropiques mission: a review after three years in orbit. *Front. Earth Sci.*, 3:17, doi:10.3389/feart.2015.00017, **2015**.
15. Sivira R., **H. Brogniez**, C. Mallet and Y. Oussar: A layer-averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations: design and results for the Megha-Tropiques payload. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 1055-1071, doi :10.5194/amt-8-1055-2015, **2015**
14. Clain G., **H. Brogniez**, V. H. Payne, V.O. John and M. Luo: An assessment of SAPHIR calibration using quality tropical soundings. *J. Atmos. Oc. Techn.*, 32 (1), 61-78,doi :11.1175/JTECH-D-14-00054.1, **2015**.
13. **Brogniez H.**, G. Clain and R. Roca: Upper Tropospheric Humidity from SAPHIR/Megha-Tropiques: algorithm overview and validation against tropical soundings. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, doi :10.1175/JAMC-D-14-0096.1, **2015**.
12. Schröder M., R. Roca, L. Picon, A. Kniffka and **H. Brogniez**: Climatology of free tropospheric humidity: extension to the SEVIRI era, evaluation and exemplary analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 11.129-11.148, doi :10.5194/acp-14-11129-2014, **2014**.
11. Roca R., R. Guzman, J. Lemond, J. Meijers, L. Picon and **H. Brogniez**: Tropical and extra-tropical influences on the distribution of free tropospheric humidity over the intertropical belt. *Survey in Geophysics*, doi:10.1007/s10712-011-9169-4, **2012**.
10. **Brogniez H.**, P.E. Kirstetter and L. Eymard: Expected improvements in the atmospheric humidity profile retrieval using the Megha-Tropiques microwave payload. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.1869, **2011**.
9. Aires F., F. Bernardo, **H. Brogniez** and C. Prigent: An innovative calibration method for the inversion of satellite observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 2458–2473, doi: 10.1175/2010JAMC2435.1, **2010**.
8. Montoux N., P. Keckhut, A. Hauchecorne, J. Jumelet, **H. Brogniez** and C. David : Isentropic modeling of a cirrus cloud event observed in the mid-latitude UTLS. *J. Geophys. Res.*, 115, D2, doi:10.1029/2009JD011981, **2010**.
7. Roca R., J-C Bergès, **H. Brogniez**, M. Capderou, P. Chambon P, O. Chomette, S. Cloché, T. Fiolleau, I. Jobard, J. Lémond, M. Ly, L. Picon, P. Raberanto, A. Szantai and M. Viollier : On the water and energy cycle in the Tropics. *Comptes Rendus Géosciences "Atmosphère vue de l'espace"*, 342, 390-402, **2010**.
6. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon : A study of the free tropospheric humidity interannual variability using Meteosat data and an advection-condensation transport model. *J. Clim.*, 22, 6773-6787, **2009**.
5. **Brogniez H.** and R.T. Pierrehumbert : Intercomparison of tropical tropospheric humidity in GCMs with AMSU-B water vapor data. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17706, doi:10.1029/2007GL030967, **2007**.

4. Pierrehumbert R.T., **H. Brogniez**, and R. Roca : On the relative humidity of the Earth's atmosphere. In *The Global Circulation of the Atmosphere*, T. Schneider and A. Sodel Eds. Princeton University Press, **2007**.
3. **Brogniez H.** and R.T. Pierrehumbert : Using microwave observations to assess large-scale control of the free tropospheric water vapor in the mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14801, doi:10.1029/2006GL026240, **2006**.
2. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon : A clear sky radiances archive from METEOSAT "water vapor" observations. *J. Geophys. Res.*, **111**, D21109, doi:10.1029/2006JD007238, **2006**.
1. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon : Evaluation of the tropical free tropospheric Humidity in AMIP-2 simulations using METEOSAT Water Vapor channel data. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2005GL024341, **2005**.

Rapports de contrats

1. Roca R., J. Meijer-Fofana, L. Picon and **H. Brogniez**: Climatology of free tropospheric humidity: Extension to SEVIRI, error analysis and trend assessment, *Working Contract Report to CMSAF*, 42 pages, June 2012.
2. Roca R., **H. Brogniez**, N. Gif and L. Picon: Development of a consistent climatology of free tropospheric humidity employing observations from METEOSAT satellites, *Working Contract Report to CMSAF*, 47 pages, October 2009.

Communications orales dans des conférences nationales et internationales

2016
(incluant
les
prévues)

1. Sinigoj P., L. Picon, and **H. Brogniez** : Representation of the tropical free tropospheric humidity and its variability in large scale models. *The EGU General Assembly, Vienna, Austria, 17-22 April 2016*.
2. **Brogniez H.** : Opportunities offered by Megha-Tropiques. Humidity profiles from SAPHIR : what are the possibilities ? *ISSI workshop on « shallow clouds, water vapor, circulation and climate sensitivity », Bern, Switzerland, 8-12 February 2016*.

2015

3. **Brogniez H.**, S. English and J-F Mahfouf : A report on the outcomes of a workshop aimed at improved understanding of biases observed in analysis of 183GHz observations. *5th GEWEX water vapor assessment workshop, Madison, USA, 4-5 November 2015*.
4. **Brogniez H.**, S. English and J-F Mahfouf : A report on the outcomes of a workshop aimed at improved understanding of biases observed in analysis of 183GHz observations. *International TOVS Study Conference, Lake Geneva, USA, 28 October - 3 November 2015*.
5. Roca R. and the french Megha-Tropiques Science Team : The Megha-Tropiques mission : Status after 4 years in orbit. *ESA Earth Observation for Water Cycle, Frascati, Italy, 20-23 October 2015*.
6. Schroder M., R. Roca, L. Picon, A. Kniffka, **H. Brogniez**, and K. Fennig : Climatology of free tropospheric humidity : extension into the SEVIRI era, evaluation and exemplary analysis. *The 2015 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Toulouse, France, 21-25 September 2015*.
7. **Brogniez H.**, S. English, and J-F Mahfouf : A bias in observations in the 183GHz line : some clues to understand it. *The 2015 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Toulouse, France, 21-25 September 2015*.
8. Wilheit T., W. Berg, **H. Brogniez**, S. Datta, V. Payne, and J. Wang: Use of MHS and SAPHIR for the validation of GMI. *The 2015 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Toulouse, France, 21-25 September 2015*.

2014

9. T. Garot, **H. Brogniez**, and N. Viltard : Typhoon Bopha : impact of an extreme tropical cyclone on the tropospheric water and energy cycle. *The EGU General Assembly, Vienna, Austria, 12-17 April 2015*.
10. **Brogniez H.**, R. Sivira, G. Clain, R. Roca and C. Mallet : Evaluation of the atmospheric humidity as seen by SAPHIR/Megha-Tropiques : accounting for uncertainties. *4th GEWEX water vapor assessment workshop, Berlin, Germany, 9-10 October 2014*.
11. T. Garot, **H. Brogniez** and N. Viltard : Impact of tropical mesoscale convective systems on upper tropospheric humidity : exploitation of Megha-Tropiques data. *The 2014 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Geneva, Switzerland, 22-26 September 2014*.

12. **Brogniez H.**, R. Sivira, C. Mallet and G. Clain : Evaluation of the atmospheric humidity as seen by SAPHIR/Megha-Tropiques: accounting for uncertainties. *The 2014 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Geneva, Switzerland, 22-26 September 2014.*
13. V. Payne, T. Wilheit, J. Wang, W. Jones, S. Datta, A. Santos-Garcia, **H. Brogniez**, G. Clain, M. Luo, JL Moncet and E. Mlawer : Use of SAPHIR and GMI for intercalibration of polar orbiting passive microwave water vapor sounders. *The 2014 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Geneva, Switzerland, 22-26 September 2014.*
14. G. Clain, **H. Brogniez**, V.O. John, V.H. Payne and M. Luo : Evaluation of SAPHIR/Megha-Tropiques observations - CINDY/DYNAMO campaign. *The EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April - 2 May 2014.*
15. **Brogniez H.** and R. Roca : First sight of the Upper Tropospheric Humidity variability during CINDY-DYNAMO: Exploitation of the SAPHIR measurements. *The 31st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego, California, USA, 31 March - 4 April 2014.*
- 2013 16. Wilheit T., **H. Brogniez**, S. Datta, W.L. Jones, V. Payne, E. Stocker and J. Wang: The use of SAPHIR on Megha-Tropiques for intercalibration of polar-orbiting microwave water vapor sounders. *The 2013 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Vienna, Austria, 16-20 September 2013.*
17. Clain G. and **H. Brogniez** : Validation of Brightness Temperatures observed by SAPHIR instrument onboard Megha-Tropiques satellite. *The 2013 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Vienna, Austria, 16-20 September 2013.*
18. **Brogniez H.**, G. Clain and C. Dufour : Evaluation of SAPHIR calibration. *GPM Intersatellite Calibration (X-CAL) meeting, Toulouse, France, 23-24 May 2013.*
- 2012 19. Roca R., **H. Brogniez**, O. Chomette, M. Gosset, P. Raberanto and N. Viltard : Overview of the Megha-Tropiques scientific activities in France. *1st Indo-French Megha-Tropiques Scientific Workshop, ISRO Headquarters, Bangalore, India, 17-19 December 2012.*
20. **Brogniez H.**, G. Clain, R. Sivira and C. Dufour : Overview of the French effort around Megha-Tropiques data: the atmospheric water vapor. *1st Indo-French Megha-Tropiques Scientific Workshop, ISRO Headquarters, Bangalore, India, 17-19 December 2012.*
21. Viltard N., R. Roca, **H. Brogniez** and M. Gosset : Megha-Tropiques mission status. *6th International Precipitation Working Group workshop, Sao José dos Campos, Brazil, 15-19 October 2012.*
22. Roca R., L. Picon, **H. Brogniez**: Water vapor in the climate: why do we need assessed data ? *2nd GEWEX water vapor assessment workshop, Offenbach, Germany, 26-28 September 2012.*
23. Sivira R., **H. Brogniez**, C. Mallet and Y. Oussar : Tropospheric Relative Humidity Profile Statistical Retrievals and their Confidence Interval from Megha-Tropiques Measurement. *9th International Symposium on Tropospheric Profiling, L'Aquila, Italy, 3-7 September 2012.*
24. Sivira R., **H. Brogniez** and C. Mallet : Retrieval of relative humidity profiles and its associated error from Megha-Tropiques measurements. *International Radiation Symposium, Berlin, Germany, 6-10 August 2012.*
25. Picon L., R. Roca, **H. Brogniez** and M. Schroder : Recent climate variability in West Africa from long series of METEOSAT data. *4th AMMA Conference, Toulouse, France, 2-6 July 2012.*
26. Roca R., **H. Brogniez**, O. Chomette, M. Gosset, P. Raberanto and N. Viltard : Megha-Tropiques : le cycle de l'eau et de l'énergie sous les tropiques, *1^{er} colloque de restitution du TOSCA, Paris, France, 21-22 mars 2012.*
27. **Brogniez H.**, R. Sivira, P-E Kirstetter, C. Mallet and F. Marquisseau: La vapeur d'eau atmosphérique avec Megha-Tropiques, *2nd colloque Megha-Tropiques, Bordeaux, France, 14-16 March 2012.*
28. Gosset M. **H. Brogniez**, F. Cazenave, R. Roca and N. Viltard : Un plan de validation sol (MTGV) intertropical pour MT, *2nd colloque Megha-Tropiques, Bordeaux, France, 14-16 March 2012.*
29. Roca R., **H. Brogniez**, O. Chomette, M. Gosset, P. Raberanto and N. Viltard : The Megha-Tropiques Mission: Overview, *92nd American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, USA, 22-26 January 2012.*
- 2011 30. Roca R., **H. Brogniez**, O. Chomette, M. Gosset, P. Raberanto and N. Viltard : Water and Energy Cycles in the Tropics: the Megha-Tropiques Mission, *Atelier franco-japonais sur l'utilisation scientifique des données des missions spatiales d'observation de la Terre, Tokyo, Japon, 2 December 2011.*
31. **Brogniez H.**, R. Sivira, P-E Kirstetter, F. Marquisseau and C. Mallet : The Megha-Tropiques payload: a contribution to the monitoring of the tropical water vapor. *Final COST workshop on the Atmospheric Water Vapour in the Climate System, Paris, France, 26-28 sept 2011.*

32. Picon L., R. Roca, J. Meijer, **H. Brogniez**, M. Schroder and A. Kniffka: Climate short term evolution of the free tropospheric humidity from METEOSAT data. *Final COST workshop on the Atmospheric Water Vapour in the Climate System, Paris, France, 26-28 sept 2011.*
33. Roca R., L. Picon and **H. Brogniez** : Free Tropospheric Humidity from GEO platforms : A long time series perspective. *GEWEX/GlobVapour workshop on long term water vapor datasets and their quality assessment (ESA/ESRIN), Frascati, Italy, 8-10 March 2011.*
34. Roca R., **H. Brogniez** and L. Picon : Variability of the humidity of the free troposphere over the intertropical belt, *Observing and modelling Earth's energy flows, ISSI, Bern Switzerland, 10-14 January 2011.*
- 2010 35. Picon L., R. Roca, **H. Brogniez**, R. Guzman and J. Lémond : Humidité de la troposphère libre à partir des canaux vapeur d'eau dans l'IR. *Réunion du GdR « Radiométrie Microonde pour l'Etude de l'Atmosphère », Paris, France, 6 octobre 2010.*
36. Lémond J., L. Picon, R. Roca, **H. Brogniez** and R. Guzman : Humidité de la troposphère libre tropicale. *Colloque « Satellites grand champ », Clermont-ferrant, 21-22 janvier 2010.*
37. Schulz J., **H. Brogniez**, V. John, R. Roca, M. Schroder and L. Shi : Towards improved global data sets for upper tropospheric humidity: a pilot activity of the global network of R/SSC-CMS. *The 2009 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Bath, England, September 2009.*
- 2009 38. Montoux N., P. Keckhut, A. Hauchecorne, **H. Brogniez** and C. David : Modelling the cirrus occurrence at mid-latitudes through the isentropic transport. *LAMAS-LAPSO-LACS Joint Assembly (MOCA), Montréal, Canada, 19-29 July 2009.*
39. Aires F., **H. Brogniez**, F. Bernardo and C. Prigent : Combined SAPHIR/MADRAS retrievals under clear and non-precipitating situations. *International conference on Megha-Tropiques Science and Applications, Bangalore, India, 23-25 March 2009.*
40. **Brogniez H.**, E. Rivière, F. Aires, N. Amarouche, L. Eymard and G. Durry : A validation scheme for the Megha-Tropiques SAPHIR water vapor profiles. *International conference on Megha-Tropiques Science and Applications, Bangalore, India, 23-25 March 2009.*
41. Gosset M., R. Roca, **H. Brogniez**, O. Chomette, L. Eymard, E. Rivière, N. Viltard and M. Viollier : Megha-Tropiques CALibration/VALidation: a proposal from the French Mission Group. *International conference on Megha-Tropiques Science and Applications, Bangalore, India, 23-25 March 2009.*
- 2008 42. Picon L., R. Roca, **H. Brogniez** and J. Lémond : Surveillance et analyse climatique de l'humidité de la troposphère libre depuis l'espace: exemple des données METEOSAT. *Colloque CNFEGG, UNESCO, Paris, France, 17-19 November 2008.*
43. Roca R., **H. Brogniez** , J. Lémond and L. Picon : On the distribution of the Free Tropospheric Humidity from METEOSAT. *The 2008 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Germany, 8-12 September 2008.*
44. Aires F., F. Bernardo and **H. Brogniez** : Combined SAPHIR/MADRAS retrievals under clear and non-precipitating situations. *1^{er} colloque Megha-Tropiques, La Rochelle, France, 11-13 June 2008.*
- 2007 45. Keckhut P., N. Montoux, S. Bekki, **H. Brogniez**, C. David and J. Jumelet : Cirrus climatology at mid-latitude observed with lidar. *SPARC/SCOUT-O3/NDACC/CNRS Reunion Island Symposium, Tropical Stratosphere - Upper Troposphere, Saint-Gilles les Bains, 5-9 November 2007.*
46. **Brogniez H.**, R. Roca, J. Lemond and L. Picon: Variability of 22 years of METEOSAT First Generation Water Vapor observations. *Joint EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th American Meteorological Society (AMS) Satellite Meteorology & Oceanography Conference, Amsterdam, The Netherlands, 24-28 September 2007.*
47. Lemond J., L. Picon, R. Roca and **H. Brogniez**: Variabilité interannuelle de la vapeur d'eau tropicale en haute troposphère. *METEOSAT SECONDE GENERATION colloquium: un nouvel instrument de suivi de l'environnement, Dijon, France, 13-14 September 2007.*
48. **Brogniez H.**, C. Lemaître, T. Fiolleau, R. Roca and L. Picon: Liens entre la vapeur d'eau troposphérique et la couverture nuageuse: Etude de la campagne AMMA 2006. *METEOSAT SECONDE GENERATION colloquium: un nouvel instrument de suivi de l'environnement, Dijon, France, 13-14 September 2007.*
- 2006 49. Roca R., **H. Brogniez**, F. Chopin, A. Deme, M. Desbois, T. Fiolleau, I. Jobard, J-P Lafore, A. Le Morvan, L. Picon, K. Ramage, B. Six and M. Tomassini: Some tropical water cycle climatic studies from operational met satellites. *CM-SAF, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Germany, 29 June 2006.*
- 2005 50. Roca R., **H. Brogniez** and L. Picon: METEOSAT observations of the Free Tropospheric Humidity: large-scale dynamical interpretation and GCMs performances. *3rd Indo-French workshop on Megha-*

Tropiques under ISRO-CNES Programme on Atmosphere, Climate and Oceanography, Ahmedabad, India, 17-20 October 2005.

51. Roca R., **H. Brogniez** and L. Picon: Free Tropospheric Humidity in the tropics: METEOSAT observations and large-scale dynamics interpretation. *Keynote presentation, 2nd CM-SAF User and Training Workshop, Nuremberg, Germany, 28-31 August 2005.*
- 2004 52. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon: Evaluation de l'humidité de la troposphère libre tropicale dans les MCGs avec METEOSAT: Méthodologie et application à AMIP-2. *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère "Contrôle et vérification des modèles", Toulouse, France, 29-30 November 2004.*
53. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon: Interannual and intraseasonal variabilities of the Free Tropospheric Humidity using METEOSAT Water Vapor channel over the Tropics. *The 2004 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Prague, Czech Republic, 31 May-4 June 2004.*
- 2003 54. Roca R., **H. Brogniez**, L. Picon and M. Desbois: Free Tropospheric Humidity observations from METEOSAT water vapor data. *The AMS Conference, Long Beach, USA, February 2003.*
- 2002 55. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon: First results of the AMIP2 GCMs evaluation using METEOSAT Water Vapor data. *The AMIP Workshop: towards innovative Model Diagnostics. Report of the World Climate Research Program. Toulouse, France, 12-15 November 2002.*
- 2001 56. Roca R., **H. Brogniez**, L. Picon and M. Desbois, 2001: High resolution of Free Tropospheric Humidity from METEOSAT over the Indian Ocean. *The MEGHA-TROPQUES 2nd Scientific Workshop, Paris, France, 2-6 July 2001.*

Posters dans des conférences nationales et internationales

- 2015 1. **Brogniez H.**, G. Clain, V. Payne, V. John, M. Luo, C. Dufour and R. Fallourd : Analyse des erreurs et incertitudes dans la raie de la vapeur d'eau à 183GHz : apport de l'instrument SAPHIR. *Atelier Transfert Radiatif dans les Atmosphères Terrestres pour les Observations Spatiales (TRATTORLA), Lille, France, 23-25 March 2015.*
- 2014 2. **Brogniez H.**, G. Clain, R. Sivira, C. Dufour and R. Fallourd : Water vapor of the tropical atmosphere from the SAPHIR microwave sounder. *1^{ere} Réunion du GdR Megha-Tropiques, Bordeaux, France, 3-5 December 2014.*
3. **Brogniez H.**, G. Clain, R. Sivira, C. Mallet and V. Payne : Relative humidity of the tropical atmosphere as seen by SAPHIR/Megha-Tropiques and comparison against high quality tropical soundings. *The 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle, The Hague, The Netherlands, 14-17 July 2014.*
- 2012 4. Sivira R., **H. Brogniez**, C. Mallet and Y. Oussar : Tropospheric relative humidity statistical retrievals and their confidence interval from Megha-Tropiques measurements. *1st Indo-French Megha-Tropiques Scientific Workshop, ISRO Headquarters, Bangalore, India, 17-19 December 2012*
5. **Brogniez H.**, F. Marquisseau, F. Aires and F. Bernardo: The Megha-Tropiques payload: a contribution to the monitoring of the tropical water vapor. *2nd colloque Megha-Tropiques, Bordeaux, France, 14-16 March 2012*
- 2010 6. **Brogniez H.**, L. Eymard, F. Marquisseau and P-E. Kirstetter : Le radiomètre micro-ondes SAPHIR : pour une meilleure description verticale de la vapeur d'eau troposphérique. *Colloque « Tropiques », Toulouse, France, 1-3 June 2010.*
7. **Brogniez H.**, P. Fanise and J-C. Dupont : Le radiomètre bi-fréquences DRAKKAR. *Journées SIRT4, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 31 mars 2010.*
- 2009 8. Guzman R., **H. Brogniez**, L. Picon and R. Roca, A preliminary study of the clear-sky greenhouse effect and its links with water vapor over land in the tropics. *« Water Vapor in the Climate System » international summer school, Cargèse, France, 14-26 september 2009.*
9. **Brogniez H.**, R. Roca, T. Fiolleau and L. Picon: Moisture environment of a mesoscale cloud system: a case study from the 2006 AMMA campaign. *EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April 2009.*
10. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon: An interpretation of the Free Tropospheric Humidity interannual variability observed from METEOSAT using a transport model. *EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April 2009.*
- 2008 11. **Brogniez H.**, R. Roca, and L. Picon and: Free Tropospheric Humidity from METEOSAT: Link to

large-scale dynamic . *AGU Chapman Conference on Atmospheric Water Vapor and Its Role in Climate, Kailua-Kona, Hawaii, USA, 20–24 October 2008.*

12. Roca R., J. Lémond, L. Picon and **H. Brogniez** : On the distribution of the Free Tropospheric Humidity in the intertropical belt. *AGU Chapman Conference on Atmospheric Water Vapor and Its Role in Climate, Kailua-Kona, Hawaii, USA, 20–24 October 2008.*

13. **Brogniez H.**, R. Roca, L. Picon, M. Schroder and J. Schultz: Long-term Measurements of Water Vapor in the Troposphere From Space: Where do we Stand? *AGU Chapman Conference on Atmospheric Water Vapor and Its Role in Climate, Kailua-Kona, Hawaii, USA, 20–24 October 2008.*

14. Aires F., **H. Brogniez** , F. Bernardo and C. Prigent: Retrieval of atmospheric water vapor profile using the Megha-Tropiques platform. *International TOVS Study Conference XVI, Angra dos Reis, Brazil, 7-13 May 2008.*

15. Aires F., **H. Brogniez** , F. Bernardo and C. Prigent: Retrieval of atmospheric water vapor profile using Megha-Tropiques platform. *10th specialist meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Florence, Italy, 11-14 March 2008.*

2007 16. **Brogniez H.**, R. Roca, C. Lemaître and L. Picon: A study of the relationship between Free Tropospheric Humidity and cloudiness during AMMA using Meteosat Second Generation. *2nd International AMMA Conference, Karlsruhe, Germany, 26-30 November 2007.*

2005 17. Roca R., **H. Brogniez** and L. Picon: A 14-years METEOSAT Water Vapor database for the evaluation of general circulation models over tropical areas. *AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 5-9 December 2005.*

18. **Brogniez H.** and RT Pierrehumbert: Analysis of the influence of a climate change on the free tropospheric water vapor distribution over mid-latitudes areas in GCMs. *AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 5-9 December 2005.*

2003 19. **Brogniez H.**, R. Roca and L. Picon: Interannual variability of the Free Tropospheric Humidity over Tropical Atlantic and Africa. *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April 2003.*

2001 20. Roca R., **H. Brogniez**, TF Yang, L. Picon and M. Desbois: Multi-scale observation of upper tropospheric humidity over the Indian Ocean. *Global Energy and Water cycle EXperiment Conference, Paris France, 10-14 September 2001.*

Autres contributions

1. Contribution à la « GEWEX newsletter » (mensuel) parue en novembre 2015.
2. Intervenante invitée au colloque « Objectif Climat » organisé par le département Sciences de la Planète et de l'Université Paris-Saclay, le 12 novembre 2015 : « Nouvelles frontières pour la modélisation du climat ».
3. Contribution pour une illustration du livre « Incertitudes sur le climat » de Katia et Guy Laval, éd. Belin, *publié en 2013.*
4. Contribution pour une illustration à la brochure « Changement Climatique & Satellites » édité par Rémy Roca et Dominique Murat pour Thalès Alenia Space, *publié en 2008.*
5. Participation à l'élaboration de la brochure « MSG – Meteosat Second Generation – In Orbit - In use » publiée par EUMETSAT à l'occasion du lancement de MSG-2, *déc. 2005.*
6. Participation à l'organisation de la conférence « Global Energy and Water cycle Experiment » (GEWEX) au Collège de France, Paris, *10-14 sept 2001.*
7. Participation à l'organisation d'une visite du LMD/X par une école primaire de Palaiseau « Initiation au changement climatique et à l'importance de la vapeur d'eau dans le climat », *novembre 2001.*

IV. DOSSIER DE RECHERCHE

1) Introduction générale

Depuis mon stage de DEA en 2001 au sein de l'ancienne équipe « Cycle de l'Eau dans les Tropiques » du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), j'ai choisi de contribuer à la compréhension du cycle de l'eau dans l'atmosphère, en m'attachant aux processus impliqués dans la distribution de la vapeur d'eau depuis les échelles synoptiques jusqu'aux échelles décennales et en confrontant les signatures de variabilité déduites des observations à celles représentées par les modèles de simulation du climat. En effet, il me semble nécessaire d'avoir un lien fort entre la communauté des observateurs et celle des modélisateurs. Le système climatique est un entremêlement complexe de processus physiques (dynamiques et thermodynamiques) qui se déroulent depuis les échelles microphysiques, qui permettent de décrire par exemple la formation des cristaux de glace et leurs interactions avec le rayonnement, jusqu'aux échelles planétaires, caractéristiques des interactions océan-atmosphère en jeu lors de phénomènes du type El Niño. Ce continuum d'échelles nécessite de coupler des modèles numériques aux moyens d'observation, avec une évaluation au moyen d'observations fiables des processus représentés explicitement ou non dans les modèles numériques. C'est pour cela que j'accorde une place privilégiée à l'observation de la vapeur d'eau atmosphérique en développant des méthodes d'estimations de celle-ci à partir de mesures par télédétection passive.

Il est inutile de reprendre de manière exhaustive ce qui a déjà été très largement présenté (et probablement mieux) dans de nombreux livres consacrés au fonctionnement du système climatique et au transfert radiatif dans l'atmosphère. En tant qu'enseignante, ces livres sont une source d'information (quasiment) inépuisable dans lesquels je me plonge fréquemment pour préparer mes cours et travaux dirigés. Je pense notamment à « Physics of Climate » de J. Peixoto & A. Oort, à « Atmospheric Science : an introductory survey » de J. Wallace & P. Hobbs, à l'incontournable « Radiation and cloud processes in the atmosphere » de K. Liou. Et puis il y a ce petit livre de poche « Le climat de la Terre » qu'Yves Fouquart m'a donné et qui ne quitte pas mon bureau...

Néanmoins comme il est important de lire ce document sans devoir se référer à ces livres, j'ai choisi de rappeler les éléments qui me semblent nécessaires à la compréhension de mes travaux et de mes projets scientifiques.

L'eau, qu'elle soit vapeur, liquide ou glacée, est l'élément principal qui caractérise notre système climatique : c'est, entre autres, la cohabitation de ces 3 phases de l'eau sur Terre qui fait de celle-ci une planète si particulière. En pratique, le stock d'eau dans l'atmosphère représente moins de 0,01% de l'eau totale sur Terre (Gleick, 1996). Cette très faible quantité est cependant essentielle dans la redistribution de l'énergie à travers le système et dans le cycle de l'eau en général, depuis l'évaporation de l'eau liquide de surface jusqu'à son retour sous forme de précipitations en passant par une variété de processus nuageux complexes. Les mouvements de la vapeur d'eau à travers le cycle de l'eau sont ainsi intimement couplés aux précipitations et à l'humidité des sols, ce qui se traduit par des climats extrêmement diversifiés sur Terre.

Le cycle de l'eau est extrêmement bien visible depuis l'espace, même si l'œil ne perçoit que les structures atmosphériques associées à la phase condensée de l'eau, comme l'illustre très bien l'une des images de la figure 1 montrant une observation de la Terre réalisée dans un canal du domaine visible. Néanmoins, les nuages ne donnent qu'une signature partielle de la dynamique atmosphérique: c'est la partie émergée de la dynamique associée aux ascendances et qui induit

généralement une instabilité convective et la formation de nuages. Les canaux d'observations appelés « Vapeur d'eau », dont une image est également mise en exemple sur la figure 1, permettent de montrer que ces parties émergées sont liées à des structures plus étendues et complexes, formées en méandres caractérisant les déplacements de l'air clair ou non. Ils constituent ainsi un outil idéal pour la documentation de la variabilité de l'eau atmosphérique.

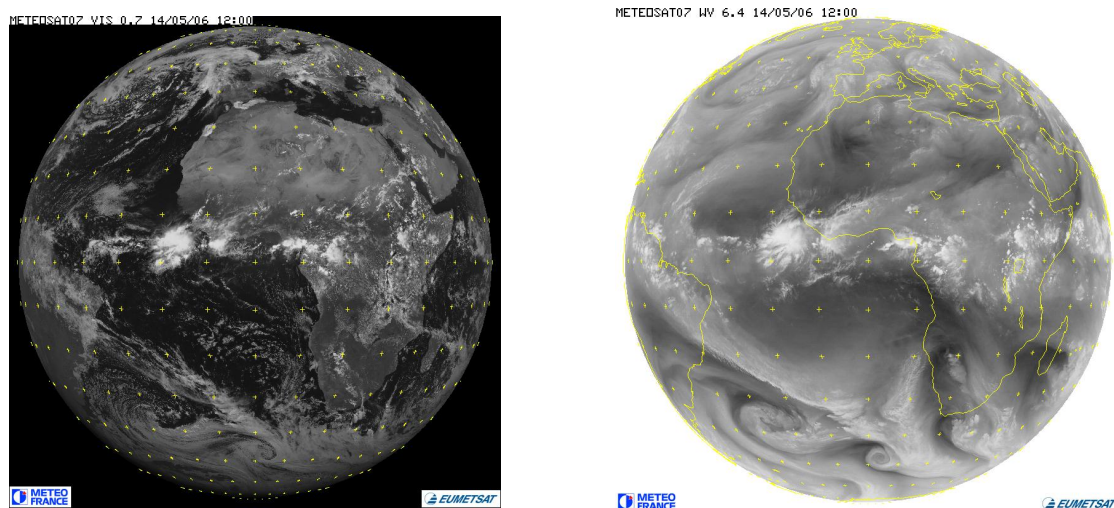


FIGURE 1 : (gauche) Observation réalisée avec le canal « visible » à $0,7\mu\text{m}$ et (droite) avec le canal « Vapeur d'eau » à $6,3\mu\text{m}$ de l'instrument MVIRI (« METEOSAT Visible and Infra-Red Imager ») du satellite METEOSAT-7. Observations du 14 mai 2006 à 12 :00TU.

Les principales caractéristiques de la circulation atmosphérique sont ainsi clairement identifiées sur les images « Vapeur d'eau » : les ascendances équatoriales d'air humide et nuageux reliées aux larges zones de subsidence d'air sec de part et d'autre de cette ceinture nuageuse et constituant les cellules de Hadley, ou encore les fronts nuageux des moyennes latitudes qui se déplacent rapidement d'Ouest en Est.

La présence de vapeur d'eau module fortement la distribution de l'énergie au sein du système climatique (e.g. Peixoto & Oort, 1996 ; Pierrehumbert, 2011 ; Allan, 2012 ; Stevens & Bony, 2013) du fait de

1. propriétés radiatives exceptionnelles, qui s'étendent depuis le domaine proche-infrarouge (IR) jusqu'aux micro-ondes (MO) ;
2. et de contraintes thermodynamiques fortes, à travers des lois énergétiques parfaitement établies ;

Ces deux aspects donnent à la vapeur d'eau une place particulièrement importante dans le système climatique et dans sa sensibilité aux forçages, et ils méritent donc qu'on s'y attarde.

1.a) Vapeur d'eau et Rayonnement

La molécule d'eau est une molécule triatomique, non linéaire, avec une nature dipolaire forte ce qui lui confère 3 modes fondamentaux de vibrations associés à 3 modes de rotations autour des axes de la molécule. L'association des multiples transitions de rotation et de rotation-vibration produit des raies d'absorption intenses et particulièrement nombreuses qui apparaissent depuis le domaine proche-IR jusqu'aux micro-ondes, comme illustré sur la figure 2. Ainsi, dans l'IR la bande

d'absorption la plus forte est située à $6,3\mu\text{m}$ et est associée à une déformation de la molécule avec des ailes qui s'étendent vers $5\mu\text{m}$ et $9\mu\text{m}$. Deux autres modes de rotation-vibration, qui sont moins étendus sont situés de part et d'autre de $2,7\mu\text{m}$, et sont associés à des étirements symétriques et asymétriques. Comme indiqué sur la figure 2, d'autres molécules qui se trouvent dans l'atmosphère ont des capacités d'absorption du rayonnement IR, et certaines sont particulièrement bien situées, comme celle à $15\mu\text{m}$ qui correspond à l'absorption par le CO_2 (molécule linéaire, n'ayant pas de mode de rotation) et localisée près du maximum d'émission de rayonnement IR de la Terre.

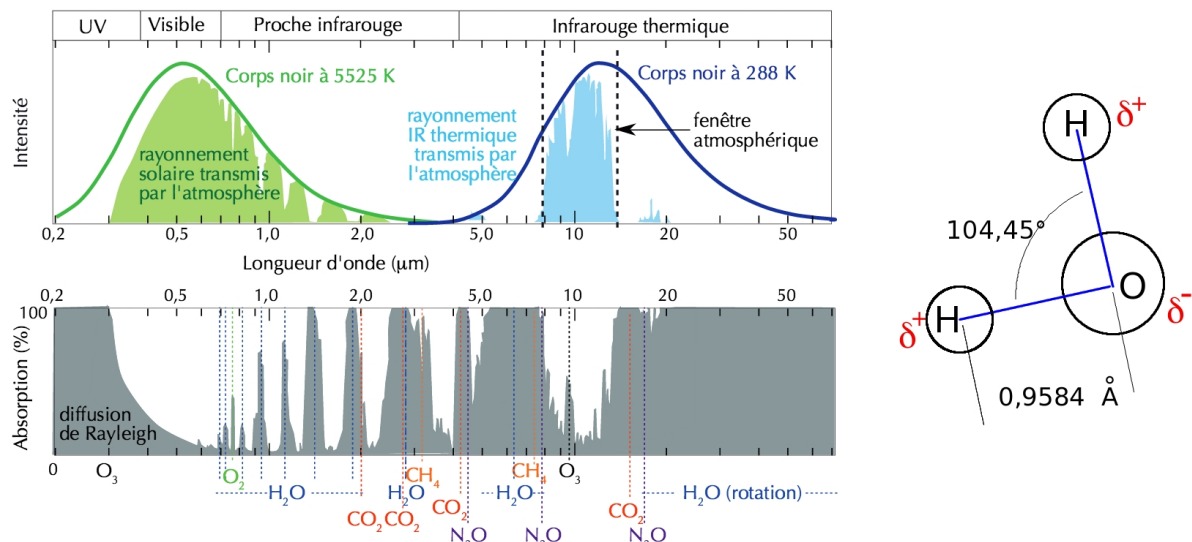


FIGURE 2 : (gauche) Spectres d'émission (haut) et d'absorption (bas) par l'atmosphère du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre émis par le sol, en l'absence de nuages et d'aérosols (Figure tirée de Poitou, 2013). (droite) Schéma de la molécule d'eau et de son dipôle.

La Terre étant en l'équilibre thermodynamique avec l'espace, tout le rayonnement reçu du Soleil qui est absorbé par la surface doit être ré-émis vers l'espace. La température d'émission de la Terre, qui vaut 255K, est aisément déterminée à partir de modèles simples d'équilibre radiatif. En ajoutant une atmosphère absorbante (et donc émissive), ils permettent de calculer une température de surface d'environ 288K. Cette température d'émission correspond à l'IR thermique. Ainsi, le rayonnement IR total émis vers l'espace par la Terre provient de la surface et des molécules qui réagissent dans cette bande spectrale. Or les hydrométéores liquides ou glacés au sommet des nuages se comportent quasiment comme des corps noirs dans l'IR thermique. Ils émettent donc vers l'espace du rayonnement selon la température de sommet du nuage auxquels ils appartiennent. En condition de ciel clair, le rayonnement est dominé par l'émission de la vapeur d'eau (Stephens & Greenwald, 1991). Les mesures du rayonnement IR sortant, nommé OLR (« Outgoing Longwave Radiation »), permettent finalement d'observer les objets rayonnants et leur altitude d'émission. La figure 3 représente l'OLR mesuré par les satellites de la NOAA (« National Oceanic and Atmospheric Administration ») et l'humidité relative de la moyenne troposphère (500hPa) telle que produite par les ré-analyses ECMWF (« European Centre for Medium-range Weather Forecasting ») ERA-Interim sur la période 1981-2010. On distingue les zones de subsidence de la circulation atmosphérique, situées à 30°N/S de part et d'autre de l'équateur. Ces zones sont les régions du globe où la majeure partie du rayonnement IR émis par la surface pour équilibrer le rayonnement reçu du soleil est émise vers l'espace (Pierrehumbert, 1995).

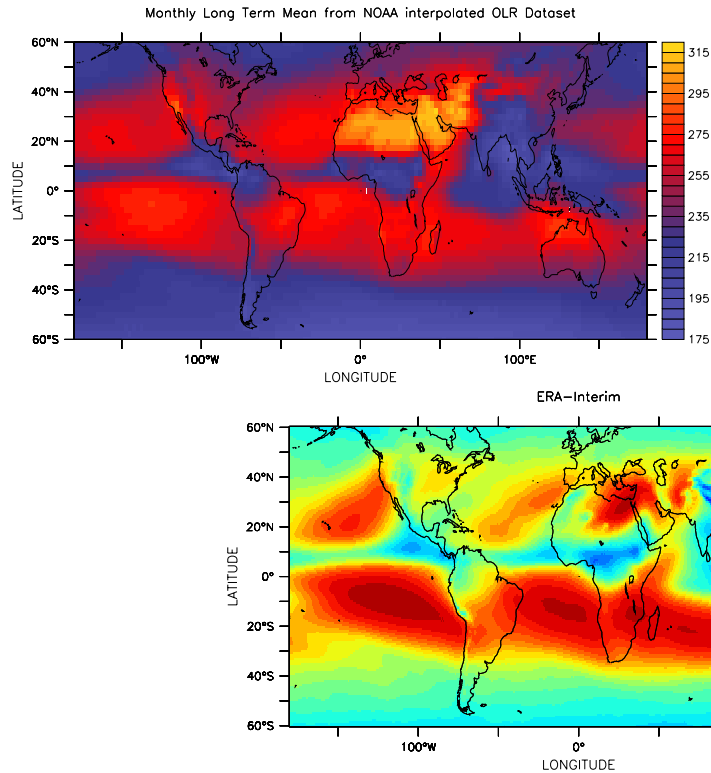


FIGURE 3 : Moyennes interannuelles sur la période 1981-2010 de **(haut)** l'OLR mesuré par la série des NOAA et de **(bas)** l'humidité relative de la moyenne troposphère (500hPa) issue des ré-analyses ERA-Interim. Seule la période Juin-Juillet-Août est considérée.

En conditions de ciel clair, l'OLR a une sensibilité fortement non linéaire à l'humidité de la troposphère libre (Spencer & Braswell, 1997) : une modification de la concentration en vapeur d'eau d'un environnement sec affecte plus fortement l'OLR qu'une modification identique d'un environnement déjà humide. Ceci est illustré par la figure 4 qui présente également la forte sensibilité de l'effet de serre, estimé à partir de l'OLR, dans les gammes de faible humidité.

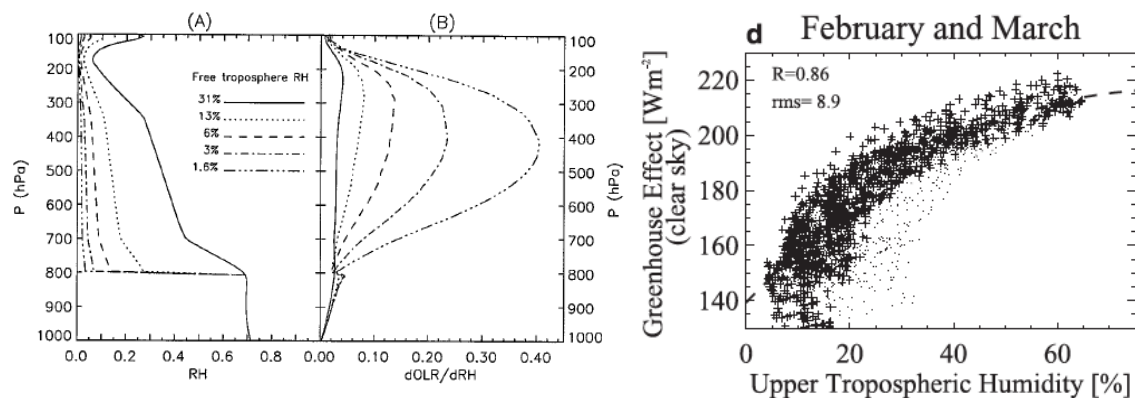


FIGURE 4 : (gauche) Sensibilité verticale de l'OLR à des variations de l'humidité relative (perturbations additives de 3%). Les profils d'humidité relative associés (cf les types de lignes) sont à gauche, et sont obtenus par modifications multiplicatives de 0.4, 0.2, 0.1 et 0.05% du profil initial (trait continu), et la correspondance en $dOLR/dRH$ est à droite. Figure tirée de Spencer & Braswell (1997). **(droite)** Diagramme en nuages de points entre l'effet de serre de ciel clair ($[OLR_{\text{ciel clair}} - OLR]$, en W/m^2) et l'humidité de la troposphère libre issus de mesures obtenues pendant la campagne INDOEX (janvier-mars 1999, Océan Indien). Figure tirée de Roca et al. (2002).

La sensibilité différenciée de l'OLR (ou de l'effet de serre en ciel clair) aux variations de l'humidité

donnent ainsi une place relativement importante aux régions de subsidence subtropicales qui sont caractérisées par une intense sécheresse de la troposphère libre, et que l'on peut observer grâce aux satellites. L'équilibre énergétique du système et sa sensibilité aux différents forçages est donc lié à la distribution spatiale et temporelle de l'humidité de ces zones.

1.b) Vapeur d'eau et Température

Le contenu en vapeur d'eau d'un volume d'air dans l'atmosphère peut se quantifier de plusieurs manières : on peut par exemple utiliser la notion de rapport de mélange, représentant la masse de vapeur contenue dans ce volume ramenée à la masse d'air sec (kg/kg), ou on peut préférer d'étudier l'éloignement du rapport de mélange au seuil d'équilibre des phases (plus couramment appelé « niveau de saturation »). C'est cette grandeur, l'humidité relative notée RH (en %), qui nous intéresse car elle exprime simplement le niveau de sécheresse de l'atmosphère :

$$RH = 100 \times \frac{e}{e_s} \quad (1)$$

où e est la pression partielle de vapeur d'eau dans la masse d'air tandis que e_s est la pression de vapeur saturante (toutes deux en hPa). Dans la suite, la saturation sera toujours calculée par rapport à la phase liquide.

A travers l'équation de Clausius-Clapeyron, la 2^e loi de la thermodynamique donne une contrainte forte sur l'évolution de e_s avec la température de l'air T :

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L_v e_s}{R_v T^2} \quad \text{ce qui se réécrit selon} \quad \frac{d \ln e_s}{dT} = \frac{L_v}{R_v T^2} \quad (2)$$

où L_v est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau ($2,6 \cdot 10^6$ J/kg) et R_v est la constante des gaz parfaits pour la vapeur d'eau (461 J/K/kg).

Cette équation permet ainsi de postuler que pour des températures typiques de la surface de la Terre (~ 300 K), la pression partielle de saturation augmente d'environ 6-7% pour chaque K de réchauffement (Figure 5, à droite), en supposant que l'humidité relative est proche d'une constante.

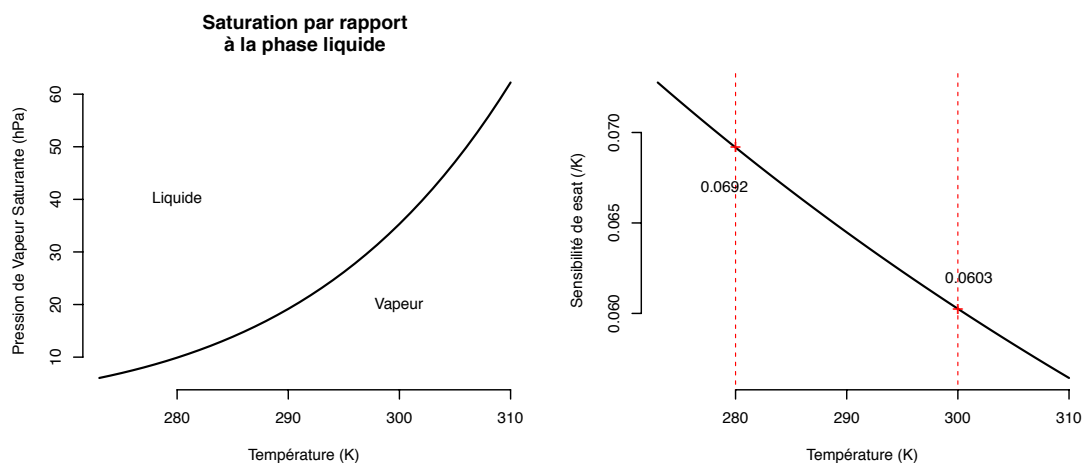


FIGURE 5 : (gauche) Pression de vapeur saturante e_s (hPa) rapportée à la phase liquide en fonction de la température (K). (droite) Sensibilité (hPa/K⁻¹) de e_s en fonction de la température.

C'est un ordre de grandeur qui est confirmé par les observations globales de la température entre 700 et 850hPa (Trenberth et al., 2003), tandis que l'augmentation est légèrement plus élevée ($\sim 9\%/K$) au-dessus des océans tropicaux, si l'on relie les variations de température des basses couches de l'atmosphère au gradient adiabatique humide (Wentz & Schabel, 2000)

1.c) Place dans le climat

De part ses propriétés exceptionnelles d'absorption du rayonnement IR et de ses liens étroits avec la température, le rôle de la vapeur d'eau dans l'évolution du climat n'est plus débattu : les principes physiques fondamentaux sont bien établis. Ainsi, parmi tant d'autres on peut mentionner les travaux de Manabe & Wetherald (1967), Stephens & Tjemkes (1993), et plus récemment Held & Soden (2000), Held & Soden (2006), O'Gorman & Muller (2010), Pierrehumbert (2011), Allan (2012), Stevens & Bony (2013). Toutes ces études soulignent la rétroaction positive de la vapeur d'eau dans le cadre d'une évolution croissante des températures de surface. Le terme de « super effet de serre » est d'ailleurs introduit par Raval & Ramanathan (1989) pour des températures de surface supérieures à 300K (dans les tropiques). Ainsi, les projections de fin de 21^e siècle du dernier exercice du GIEC pointent vers une augmentation moyenne de 2K de la température de surface du fait de différents agents, ce qui correspond à une augmentation de la pression de vapeur saturante e_s d'environ 15% si on reprend simplement l'équation de Clausius-Clapeyron discutée juste avant.

Cette augmentation du seuil de condensation autorise donc l'atmosphère à contenir plus de vapeur d'eau ce qui augmente son opacité et élève l'altitude à laquelle le rayonnement thermique sortant de l'atmosphère est émis. Ainsi que discuté par Stevens & Bony (2013), ce déséquilibre radiatif implique un ajustement soit sur l'albédo planétaire qui, en augmentant permet de réduire l'absorption du rayonnement solaire, soit une augmentation du gradient de température qui se traduit par une augmentation de la température de surface, etc.

Des schémas de rétroaction nuages-vapeur d'eau complexes émergent régulièrement. On peut par exemple mentionner l'hypothèse « d'iris » des zones sèches : une extension des zones sèches de ciel clair en lien avec le réchauffement de la surface viendrait contrebalancer celui-ci (i.e. une rétroaction négative) via un refroidissement radiatif plus important (Lindzen et al., 2001 ; Qu et al., 2002 ; Mauritsen & Stevens, 2015). Cette mention d'effet d'iris apparaît aussi dans les analyses du rôle de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau lors des processus d'aggrégation spontanée de la convection dans des modèles d'équilibre-radiatif-convectif (« ERC » [Wing & Emmanuel, 2014]), cette aggrégation amènerait également une rétroaction négative (l'aggrégation dans ces modèles ERC conduit à une concentration de l'humidité autour de la convection et amplifie la sécheresse des zones éloignées, ce qui donne finalement un refroidissement radiatif plus important). L'étude de Su et al. (2006) exploitant les observations de la haute troposphère tropicale (instrument « Microwave Limb Sounder » de la plateforme Aura) souligne quant à elle la forte relation entre la convection tropicale et plus particulièrement des nuages glacés associés à cette convection et l'humidité de la haute troposphère. La formation de nuages glacés semblant être privilégiée pour des températures de surfaces élevées ($>300K$), cette rétroaction « vapeur d'eau-convection » serait plus intense que la rétroaction thermodynamique de Clausius-Clapeyron seule.

Pour conclure, la vapeur d'eau atmosphérique est l'un des paramètres clé de la sensibilité climatique. Cette grandeur (« Upper/Free Tropospheric Humidity ») est d'ailleurs reconnue comme « Essential Climate Variable » par GEWEX (« Global Energy and Water Cycle Experiment », du « World Climate Research Program », WCRP). Or sa variabilité spatiale et temporelle est affectée par des échanges radiatifs, thermodynamiques impliquant des changements de phase et les flux dynamiques. Même si certains des principes physiques sous jacents sont bien compris car expliqués par des théorèmes de physique bien connus et robustes (comme l'équation de Clausius-Clapeyron), des modélisations détaillées et des mesures réalisées depuis le laboratoire jusqu'aux satellites sont indispensables pour préciser le rôle de chacun de ces phénomènes conduisant à l'humidification ou l'assèchement de la troposphère libre.

Cet objectif ne peut être atteint que si l'on dispose d'estimations robustes de la vapeur d'eau atmosphérique et d'informations sur ses modes de variabilités spatiale et temporelle. Du point de vue des moyens d'observations, les satellites défilants et géostationnaires sont clairement complémentaires du point de vue des processus à l'étude: alors que le satellite défilant offre une couverture globale de la Terre, au détriment de l'échantillonnage journalier (traditionnellement 2 fois par jour), le satellite en orbite géostationnaire permet une revisite beaucoup importante (30min d'intervalle) d'une région du globe.

2) Synthèse des travaux

Depuis ma thèse jusqu'à mes activités de recherche actuelles, mes travaux se développent selon deux axes principaux:

1. **L'élaboration de méthodes d'interprétation** des températures de brillance (TBs dans la suite) dites « vapeur d'eau » reliées au contenu en humidité de l'atmosphère, et ce pour différentes plateformes :
 - géostationnaires : METEOSAT (imageurs successifs MVIRI et SEVIRI) ;
 - défilants : NOAA (sondeur AMSU-B) et Megha-Tropiques (sondeur SAPHIR)
2. **L'analyse des variations spatiales et temporelles** de ces données à différentes échelles pour :
 - la documentation des processus associés au cycle de la convection ;
 - la caractérisation des tendances et des modes de variabilité, incluant une comparaison avec des modèles climatiques

2.a) Développement de méthodes d'interprétation pour les canaux passifs « Vapeur d'eau »

L'analyse de processus reposant sur des bases de données adaptées, j'ai donc orienté une partie de mes analyses sur l'élaboration de méthodes d'interprétation des mesures obtenues par des radiomètres à bord de satellites, avant de mener des études exploitant ces données.

En plus de la bande d'observation à $6,3\mu\text{m}$ évoquée précédemment, appartenant au domaine IR thermique, il existe une raie d'absorption du rayonnement dans le domaine micro-ondes (MO) centrée à $183,31\text{GHz}$ qui peut être interprétée de la même manière que dans l'IR thermique, à l'aide de méthodes dédiées.

Depuis les années 1980, et le démarrage du programme mondial d'observation de l'atmosphère terrestre, il a été démontré tout d'abord de manière empirique (e.g. Ramond et al., 1981), puis de manière analytique (Soden & Bretherton, 1993 ; Stephens et al., 1996 ; Spencer & Braswell, 1997) par une analyse de l'équation du transfert radiatif assez astucieuse, adaptée à la thermodynamique de l'atmosphère tropicale, que ces deux types d'observation peuvent être « simplement » interprétées en terme d'humidité relative moyenne localisée dans la moyenne à haute troposphère, ou FTH (pour « Free Tropospheric Humidity »).

Les outils de base communs aux deux domaines sont l'utilisation d'une base de profils thermodynamiques (pression, température, RH) représentative statistiquement des conditions atmosphériques à étudier, et d'un modèle de transfert radiatif permettant d'obtenir des TBs synthétiques mais réalistes. J'utilise le modèle RTTOV (« Radiative Transfer for TOVS »), qui est le modèle utilisé dans les systèmes d'assimilations des modèles de prévisions ECMWF et Météo-France. C'est un modèle maintenu, mis à jour régulièrement, et dont les performances sont évaluées fréquemment (Matricardi et al., 2004).

2.a.1) Dans l'Infra-Rouge thermique

Au cours de mon stage de DEA et pendant ma thèse, dirigée par Laurence Picon et Rémy Roca (LMD), j'ai mené des analyses de la variabilité la vapeur d'eau troposphérique tropicale et subtropicale, ce qui m'a amené à aborder les méthodes d'estimation adaptées aux mesures réalisées dans l'IR. Dans ce domaine spectral, le principal écueil à l'exploitation de ces observations pour la vapeur d'eau est la présence de nuages. En effet ce sont des objets qui interagissent très fortement avec le rayonnement IR montant depuis la surface, en l'absorbant. Ils dominent donc sur la signature radiative de la vapeur d'eau : c'est pour cela qu'on les distingue clairement sur la figure 1.

L'exploitation de ces mesures pour étudier la distribution et la variabilité de l'humidité atmosphérique (non condensée) requiert donc de ne considérer que les observations non nuageuses.

J'ai plus précisément traité les observations des METEOSAT 2 à 7 couvrant la période 1983-2004 dans l'objectif d'avoir une série longue homogène à haute résolution spatiale (0.625°) et temporelle (3h) afin de mener des études, sur des périodes plus ou moins longues, de la variabilité de l'humidité de la zone tropicale/sub-tropicale (i.e. 40° de part et d'autre de l'équateur). L'élaboration de cette base de données a requis un travail d'homogénéisation entre les capteurs successifs caractérisé par des fonctions instrumentales spectralement différentes, travail qui avait déjà débuté au LMD et que j'ai étendu à la fin de service de METEOSAT-5 (Picon et al., 1995 ; Picon et al., 2003 ; Brogniez et al., 2006). Ceci s'est accompagné d'une analyse théorique du transfert radiatif dans ce canal et plus précisément sur la signature nuageuse. Des simulations idéalisées basées sur l'analyse de l'effet de nuages considérés comme des corps noirs (les objets les plus émissifs) sur les TBs à 6,3μm nous ont amené à exploiter les classifications nuageuses produites par l'ISCCP (« International Satellite Cloud Climatology Project », [Rossow & Schiffer, 1991]) à l'échelle du pixel d'observation. Ceci a permis de mettre clairement en évidence le peu de contribution des nuages bas ($P_{\text{sommet}} > 680\text{hPa}$) dans les mesures à 6,3μm. Ainsi, leur conservation en plus des observations en ciel clair a nettement permis d'améliorer l'échantillonnage temporel de données généralement limitées à la considération des seules scènes de ciel clair. C'est par exemple le cas de la base équivalente à celle-ci issue des observations de l'instrument HIRS de la NOAA (« High resolution InfraRed Sounder », depuis 1981), qui sont entachées d'un biais sec induit par cette restriction. Ceci est d'ailleurs très largement discuté dans Brogniez et al. (2006). Ce travail sur les observations brutes s'est accompagné d'un ajustement d'étalonnage qui avait été décelé (Bréon et al., 2000) mais non corrigé.

Enfin, la conversion des TBs en humidité s'est reposée sur une relation analytique, brièvement évoquée plus haut, exposée par Soden & Bretherton (1993) : ces TBs sont « simplement » une signature globale de l'humidité relative de la troposphère libre pondérée par une fonction caractérisant la sensibilité de la mesure à la répartition verticale de l'humidité, considérée ici comme le seul élément absorbant, et donc la seule variable du système.

$$\ln\left(\frac{FTH}{\cos\theta} \frac{p_0}{p_0}\right) = a \times TB + b \quad \text{avec} \quad FTH = \frac{\sum_{p=\text{surface}, \text{sommet}} RH(p) \times K_{RH}(p)}{\sum_{p=\text{surface}, \text{sommet}} K(p)} \quad (3)$$

Ici, θ correspond à l'angle d'observation par le radiomètre et p_0 est un paramètre de normalisation qui représente la (faible) variabilité de la structure thermique de l'atmosphère tropicale. La fonction jacobien $K_{RH} = \partial TB / \partial RH$ (K/%) est utilisée comme fonction de pondération du profil de RH. Elle est représentée sur la figure 6 pour quelques atmosphères typiques des régions tropicales et sub-tropicales. C'est une fonction qui s'élargit et dont le maximum s'abaisse avec la sécheresse de la colonne atmosphérique. On voit aussi que le coefficient directeur de la relation FTH-TB est négatif : ainsi une TB élevée (chaude) indique que le rayonnement mesuré provient de couches atmosphériques plus proches de la surface, c'est-à-dire qu'il y a moins de corps absorbants. On a donc une troposphère libre sèche. A contrario une TB faible (froide) indique que le rayonnement mesuré provient de couches plus élevées, c'est-à-dire qu'il y a plus d'absorbants dans la colonne. On a donc une troposphère libre humide.

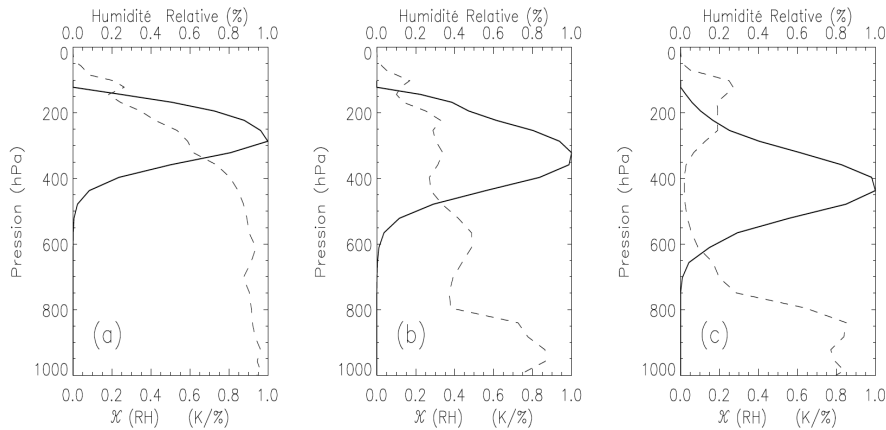
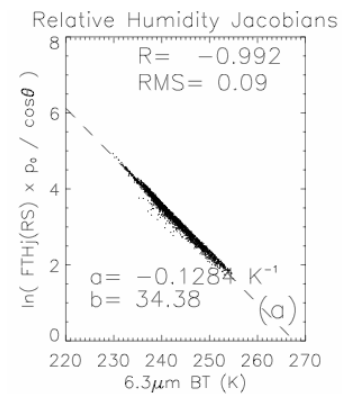


FIGURE 6: Jacobiens \mathcal{K}_{RH} (courbes pleines) du canal $6,3\mu\text{m}$ METEOSAT pour 3 atmosphères tropicales : (a) humide, (b) standard et (c) sèche. Les profils de RH associés sont les courbes tiretées. Figure tirée de Brogniez (2004).

Avec cette définition de FTH, les caractéristiques statistiques de la méthode d'estimation (Figure 7) sont réduites d'un facteur 2 par rapport aux fonctions utilisées à l'époque déjà très bonnes. Ces aspects sont discutés dans l'annexe de Brogniez et al. (2009).

FIGURE 7: Diagramme de nuages de points représentant les termes de l'équation (3), et en utilisant le jacobien \mathcal{K}_{RH} comme fonction de pondération verticale. Les statistiques de la régression sont indiquées. Figure tirée de Brogniez et al. (2004).



Cette base de données nouvelles a permis d'entamer (car les possibilités sont loin d'avoir été toutes exploitées) des études sur la variabilité de l'humidité de la zone METEOSAT. Les résultats de ces études sont résumés dans la partie consacrée aux analyses de variabilité spatiale et temporelle. La figure 8 donne un avant goût de cette variabilité pour l'été moyen de la période 1983-2004.

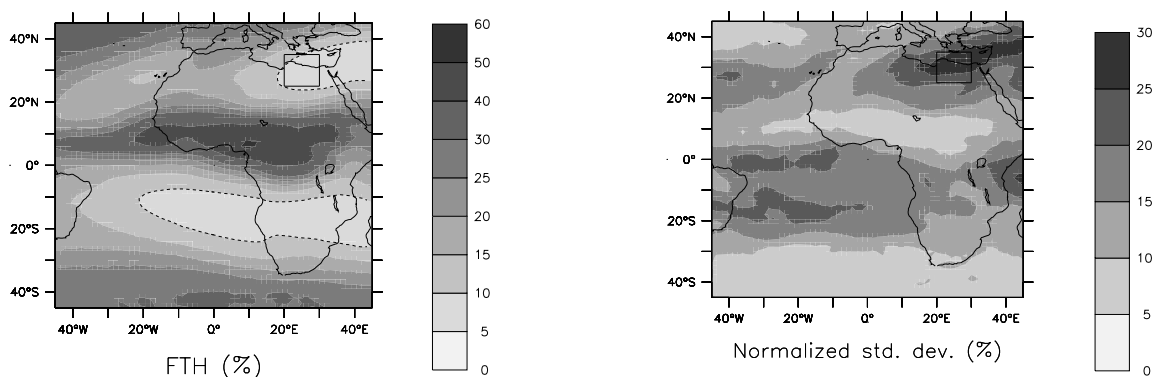


FIGURE 8: (gauche) Moyenne et (droite) écart-type normalisé interannuels pour la période Juin-Juillet-Août 1984-2004. La petite boîte dans la partie Nord-Est délimite la zone qui sera plus amplement analysée en termes de processus. Figure tirée de Brogniez et al. (2009)

Elle montre les zones humides de la Zone de Convergence Intertropicale ainsi que les régions très sèches subtropicales où l'humidité moyenne ne dépasse pas 5%, mais qui présentent une très forte variabilité relative, jouant comme discuté précédemment un rôle clé pour l'OLR.

La chaîne de traitement des mesures METEOSAT que j'ai développée a depuis été implémentée avec succès auprès du CM-SAF (« Climate Monitoring – Satellite Application Facilities ») du Deutsche Wetterdienst (DWD) et en lien avec l'agence spatiale EUMETSAT, pour un traitement plus opérationnel des mesures issues de METEOSAT. Cette implémentation s'est réalisée dans le cadre d'une collaboration IPSL (LMD & LATMOS) / CM-SAF, avec l'aide de deux ingénieurs contractuels qui faisaient le lien. Le travail ainsi réalisé a conduit à étendre cette base à la période récente de METEOSAT Seconde Génération (1983-2009) pour permettre des analyses de variabilité sur des échelles plus grandes pouvant être considérées comme climatiques puisque couvrant presque 30 ans (Schröder et al., 2015). Ceci s'est déroulé dans le contexte plus global du groupe de travail international GEWEX « Water Vapor Assessment » (G-VAP, <http://www.gewex-vap.org/>, PI : M. Schröder, initié en 2011) dont l'objectif est de réaliser une revue exhaustive (dans la mesure du possible) des jeux d'observations de la vapeur d'eau atmosphérique, de faire un bilan de leurs points forts et de leur faiblesses, afin de proposer (entre autres) des références aux modèles climatiques.

2.a.2) Dans le domaine micro-ondes

J'ai prolongé ces travaux au cours de mon post-doctorat à l'Université de Chicago, en collaboration avec R. T. Pierrehumbert, en décalant spectralement les mesures pour cette fois profiter du potentiel des MO, et plus précisément de la raie située à 183,31GHz. D'un point de vue scientifique il s'agissait d'exploiter les avantages du domaine MO pour étudier les processus influençant la distribution de la vapeur d'eau troposphérique en situation nuageuse non précipitante. En effet, très proches analytiquement des mesures à 6,3 μ m, les mesures dans la raie située à 183,31GHz permettent d'estimer la vapeur d'eau même en présence de nuages. La limite apparaît ici lorsque la scène contient des nuages constitués d'hydrométéores précipitants ou de particules glacées (Isaacs & Deblonde, 1987): ces nuages combinent l'absorption de fond par la vapeur d'eau contenue dans la masse nuageuse ainsi que de la diffusion du rayonnement par les particules. Ainsi, depuis les années 1970 et le lancement du premier radiomètre MO (Nimbus-E), de nombreux scientifiques exploitent cette raie pour faire des estimations de profils de RH (Schaerer & Wilheit, 1979 ; Wang et al., 1983 ; Saunders et al., 1995 ; etc.).

Ces observations complètent celles fournies dans l'IR et les mesures conventionnelles par radiosondages dans les modèles numériques de prévision du temps (« Numerical Weather Forecasts », NWP), qui assimilent des observations et notamment celles de satellites, afin de mieux contraindre les prévisions de l'humidité atmosphérique (Andersson et al., 2005).

Ainsi, afin d'avoir des données complémentaires à la base IR METEOSAT développée au cours de ma thèse, j'ai adapté la méthode d'estimation de F_{TH} aux observations situées à $\pm 1,0$ GHz de part et d'autre du centre de la raie, provenant de l'instrument AMSU-B (« Advanced Microwave Sounding Unit-B » des satellites de la NOAA). Les canaux MO sont généralement des canaux double-bandes : la raie à 183,31GHz est quasi-symétrique (cf figure 9) et doubler les mesures de part et d'autre permet de réduire le bruit et d'atteindre des sensibilités radiométriques exploitables. Il semble qu'actuellement les technologies nouvelles devraient permettre d'atteindre les mêmes sensibilités avec des canaux simple-bande, ce qui permettrait d'éviter l'effet potentiel de l'asymétrie de la raie, principalement sur ses ailes, qui est dû à la contribution croissante de l'absorption par le continuum (j'ai eu sur le sujet de nombreuses discussions avec C. Goldstein, ingénieur CNES MO, une expertise de plus en plus rare au CNES...).

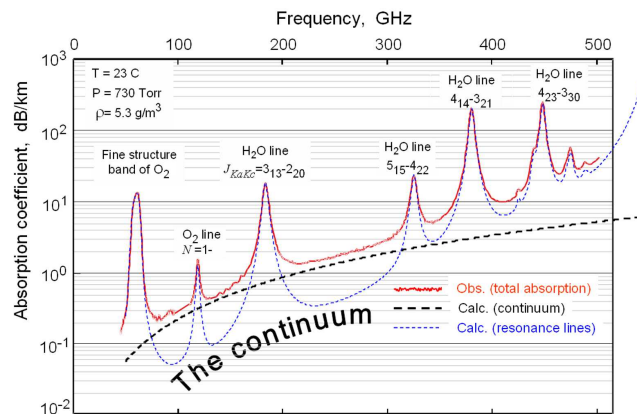


FIGURE 9: Spectre d'absorption atmosphérique obtenu en laboratoire. Les raies de résonance (courbe tiretée bleue), le continuum (courbe tiretée noire) et l'absorption totale (courbe rouge) sont indiqués. Courtoisie Microwave Spectroscopy Laboratory.

J'ai implémenté un masque nuageux spécifique, différent de celui développé pour l'IR, et basé sur l'effet de refroidissement artificiel des TBs induit par la diffusion du rayonnement par les hydrométéores (Greenwald & Christopher, 2002 ; Hong et al., 2005). Ces nouvelles données m'ont permis de réaliser des études de la variabilité de FTH aux latitudes moyennes (30°N-60°N, Brogniez & Pierrehumbert, 2006) ainsi qu'une évaluation de modèles de climat (Brogniez & Pierrehumbert, 2007).

Suite à mon intégration au CETP en 2006, devenu depuis le LATMOS, j'ai pris la responsabilité française du sondeur MO SAPHIR (« Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Intertropical par Radiométrie », Eymard et al., 2002) de la plateforme satellite franco-indienne Megha-Tropiques (MT). Ce satellite a été lancé en octobre 2011, et il propose une observation fréquente et conjointe de la vapeur d'eau, des nuages, des précipitations et du rayonnement de la zone intertropicale pour une documentation renforcée des bilans d'eau et d'énergie de cette région (<http://meghatropiques.ipsl.polytechnique.fr/>, [Desbois et al., 2007]). La plateforme est constituée de 3 instruments:

- SAPHIR qui possède 6 canaux MO dédiés à l'observation de la vapeur d'eau, depuis $183,31 \pm 0.2 \text{ GHz}$ (canal 1 - C1) jusqu'à $183,31 \pm 11.0 \text{ GHz}$ (canal 6 - C6)
- MADRAS, « Microwave Analysis and Detection of Rain and Atmospheric Structures », qui possède 5 canaux MO dédiés à l'observation des systèmes nuageux précipitants. Il a malheureusement été mis hors service après 15 mois de mesures, suite à un problème sur le mécanisme de rotation de l'instrument
- et ScaRaB, « Scanner for Radiation Budget », qui a 3 bandes larges pour la mesure du bilan radiatif.

La forte inclinaison de l'orbite (20°) permet d'avoir un échantillonnage temporel renforcé, entre 3 et 5 passages par jour en un point (les satellites polaires étant limités à 2 passages), avec cependant une région d'observation restreinte à la bande tropicale, grosso-modo 25° autour de l'équateur dépendant de la fauchée des instruments (Capderou, 2009). Un article reprenant les objectifs scientifiques de la mission ainsi que les principaux résultats obtenus après 3 ans d'observations a été publié avec tous les membres du groupe mission français (Roca et al., 2015).

Le développement des produits que nous (le groupe mission de MT) avons désignés comme « ciel non précipitant » était dépendant de ce travail scientifique, la limite des analyses algorithmiques pour l'humidité étant justement les précipitations. D'un point de vue algorithmique je me suis intéressée plus particulièrement à SAPHIR, mais les analyses en cours et notamment celles menées par T. Garot que je co-encadre avec N. Viltard (LATMOS), ont également pour base

observationnelle le couplage des observations « environnement » (i.e. SAPHIR) et « convection » (i.e. MADRAS) afin de mieux comprendre les relations de variabilité entre l'activité convective et l'humidité de l'environnement proche. La figure 10 présente la répartition des canaux de SAPHIR, depuis le centre de la raie, pour accéder à l'observation de la haute troposphère, jusqu'à ses ailes, pour un sondage plus profond de l'atmosphère. Les canaux de SAPHIR, via l'analyse de leurs jacobiens \mathcal{K}_{RH} , permettent donc d'obtenir, pour chaque pixel, une observation de l'humidité depuis la tropopause jusqu'à environ 850hPa. A l'aide d'une étude sur données synthétiques, réalisée avant le lancement de MT, nous avons pu montrer que cette configuration est plus favorable à l'estimation du profil de RH que la configuration à 3 canaux des sondeurs opérationnels de type AMSU-B (équivalents aux canaux 2, 3 et 5 de SAPHIR, [Brogniez et al., 2011]).

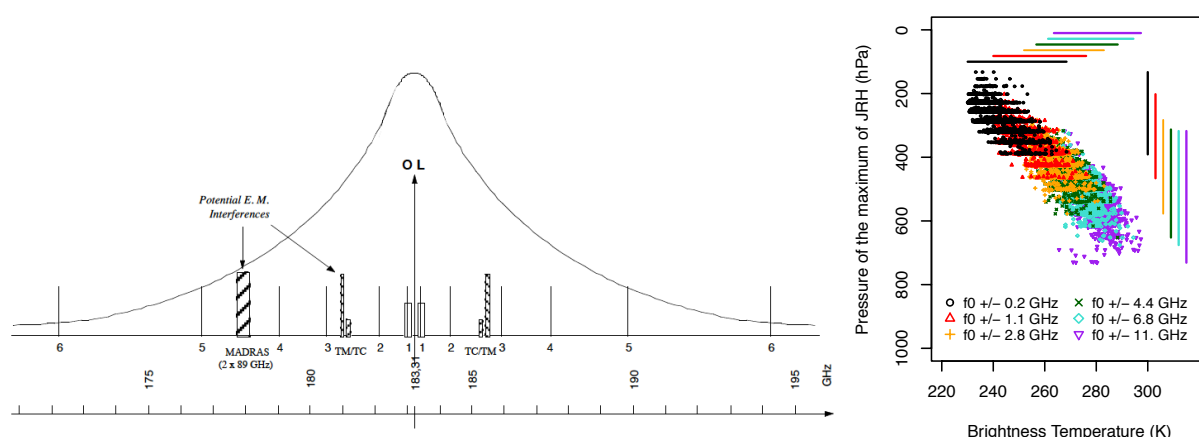


FIGURE 10 : (gauche) Position des 6 canaux de SAPHIR dans la raie 183,31GHz. Figure tirée de Eymard et al. (2002). **(droite)** Distributions des positions des maxima des jacobiens \mathcal{K}_{RH} en fonction de la TB pour chacun des 6 canaux de SAPHIR (1 canal=1 couleur) obtenus à partir de d'une base de profils synthétiques. Les traits horizontaux et verticaux représentent la gamme des valeurs couverte dans chaque configuration. Figure tirée de Brogniez et al. (2016).

2.a.3) Zoom sur SAPHIR

C'est cet instrument qui a orienté la plupart de mes travaux de recherche récents en télédétection que j'ai mené au sein du « groupe mission » MT, en étroite collaboration avec des collègues du LATMOS, du LEGOS, de l'IRD, du LMD et de Météo-France. J'ai ainsi :

- (1) élaboré les « produits géophysiques » français d'humidité relative : un profil vertical de RH (Aires et al., 2010 ; Brogniez et al., 2011 ; Sivira et al., 2015 ; Brogniez et al., 2016), et des FTH (que j'appelle dans ce cas UTHs, les fonctions de poids étant plus étroites que pour METEOSAT 6.3 μ m) les positions des canaux de SAPHIR autorisant d'en exploiter 3 de cette façon (Brogniez et al., 2015). Ces produits sont distribués à la communauté scientifique par le centre de gestion et de traitement des données ICARE (CNES/CNRS/USTL/Région Nord-Pas-de-Calais), et C. Dufour, IE au LATMOS, réalise le suivi ainsi que les corrections éventuelles.
- (2) mené à bien la validation de la « vapeur d'eau » de MT, en définissant et coordonnant la campagne de validation, incluse dans la stratégie de calibration/validation globale pilotée par l'équipe française (coordonnée par l'IRD) et financée par le CNES. Cette campagne de validation a été planifiée en collaboration avec l'IRD et l'ASECNA (« Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar »), et s'est déroulée du 29 mai au 2 août 2012 à Ouagadougou (Burkina Faso). Cette campagne a permis la

collecte de 54 profils de RH obtenus par radiosondages (dans la suite RAOBS, « RADiosounding OBServations ») très bien colocalisés avec les passages de MT (Clain et al., 2015 ; Brogniez et al., 2015).

- **Profil vertical d'humidité relative**

L'approche que j'ai privilégiée pour estimer les profils verticaux de RH ne repose pas sur les méthodes déterministes traditionnelles (1 mesure donne 1 variable géophysique) pour privilégier le contenu en information apporté par les méthodes probabilistes. En effet, les problèmes inverses nécessaires au traitement des observations par télédétection sont très généralement sous-contraints, et les instruments utilisés ont des sensibilités non infinitésimales ΔTB , qui sont affectées par le récepteur et l'antenne, le bruit et le temps d'intégration : on obtient réellement des TB à une incertitude ΔTB près pour une scène observée. Le modèle mathématique utilisé pour la résolution du problème inverse est également entaché d'incertitude puisqu'il est généralement ajusté au préalable sur des données déjà disponibles, elles-mêmes entachées d'erreurs. Ainsi, les incertitudes se propagent et donc affectent les résultats.

L'intérêt de privilégier les approches probabilistes est dans ce cas double. D'une part cela permet de tenir compte des incertitudes d'estimation lors d'une comparaison à des mesures in-situ ou à des simulations issues de modèles numériques : les différences ne seront significatives que si les barres d'incertitudes ne se recouvrent pas. D'autre part lors de l'étude de processus les probabilités d'occurrence des phénomènes pourront être exploitées, au-delà ou au-dessous d'un seuil, grâce à la connaissance de la fonction de distribution des probabilités (pdf).

Je ne vais détailler ici que le travail relatif à l'élaboration du profil de RH, la méthode d'estimation des FTH reprenant grosso-modo ce qui a été mené dans l'IR pour METEOSAT. Les détails ainsi que la validation sur données réelles sont décrits dans Brogniez et al. (2015).

De nombreuses méthodes d'estimation des profils de RH à partir de mesures à 183,31GHz existent et elles sont d'ailleurs assez performantes (des erreurs quadratiques moyennes globalement inférieures à 15% pour les estimations issues des mesures par AIRS -Atmospheric InfraRed Sounder, NASA- [Lerner et al., 2002] ou IASI -Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, CNES- [Pougatchev et al., 2009]).

La thèse de R. Sivira (2010-2013), que j'ai co-dirigée avec C. Mallet (LATMOS), avait comme objectif de développer une méthode conditionnelle d'estimation de la pdf de la RH à partir des observations de SAPHIR comme seules variables d'entrée : ARPIA « *Atmospheric Relative humidity Profile Including Analysis of confidence intervals* ». Généralement la plupart des méthodes d'estimation du profil de RH sont physico-statistiques (variationnelles ou non) : elles utilisent un profil de RH *a priori* pour contraindre l'algorithme dans un premier temps, et des modifications itératives sur ce profil permettent de l'ajuster jusqu'à une minimisation satisfaisante des écarts aux observations (e.g. Wilheit & Al-Khalaf, 1994 ; Liu & Weng, 2005). De même des méthodes multi-spectrales combinant les mesures IR et MO se répandent pour optimiser les restitutions de situations de ciel clair (Blackwell & Chen, 2006 ; Nalli et al., 2013). L'idée amont aux travaux de R. Sivira était d'extraire le maximum d'information des observations, afin d'éviter de converger vers les propriétés du profil *a priori* (comme c'est le cas de la méthode de Mathur et al. (2013), utilisant les profils d'un modèle numérique comme initialisation : les résultats sont particulièrement proches de l'état initial). Puisque nous nous sommes orientés vers une approche statistique, nous avons réalisé un travail essentiel pour l'élaboration de la base servant à l'apprentissage du modèle d'estimation, qui se doit d'être représentative des conditions thermodynamiques rencontrées dans la bande tropicale. C'est la base de radiosondages collectés et analysés par le LMD qui a été utilisée (ARSA, « Analyzed RadioSounding Archive », début en 1979), couplée au modèle de transfert radiatif RTTOV pour les calculs des TBs SAPHIR correspondantes. Enfin, des analyses de la matrice de corrélation des profils et de leurs ressemblances, via des cartes auto-organisatrices (appelées aussi

cartes de Kohonen) détaillées dans Sivira et al. (2015), nous ont amené à réduire leur dimension verticale initiale (22 niveaux de pression depuis la surface jusqu'à la tropopause) pour se limiter à 6 couches atmosphériques, s'étendant depuis 950hPa jusque 100hPa. Bien évidemment, une autre configuration verticale est envisageable, mais l'objectif que nous avions là était de placer les briques de la méthode probabiliste sur une configuration la plus réaliste possible, liée à l'instrument qui donne 6 mesures par scène observée.

Le modèle mathématique utilisé est un modèle dit « additif » (« GAMLSS » : *Generalized Additive Model for Location, Shape and Scale* exploré partiellement dans Brogniez et al., 2011) qui a la particularité de permettre l'estimation des paramètres d'une distribution statistique, dont la famille est connue *a priori*. Après une analyse des distributions observées, le choix s'est porté sur la distribution Gaussienne :

$$f(RH^k | TB_s) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(RH^k - \mu_{TB_s})^2}{2\sigma_{TB_s}^2} \right) \quad (4)$$

Ce qui se traduit comme suit : l'estimation de la valeur RH d'une couche atmosphérique ($k=1\dots 6$), conditionnée à un vecteur d'observations de **TB** (de dimension 6), est réalisée par le biais de l'estimation de μ_{TB_s} et σ_{TB_s} , qui sont la moyenne et l'écart-type de la distribution, tous deux conditionnés au vecteur **TB**.

La figure 11 illustre, en 2D, l'idée sous-jacente à la méthode qui est bien sûr mise en œuvre pour chacune des 6 TBs.

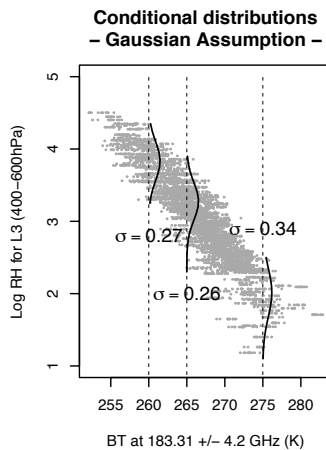


FIGURE 11 : Distribution de la moyenne de RH de la couche 400-600hPa (échelle log) selon la TB du canal 4 de SAPHIR. Les distributions conditionnelles de RH pour 3 TBs (260K, 265K et 275K) sont dessinées et les écarts-types correspondants sont indiqués. Figure tirée de Brogniez et al. (2016).

La distribution de ce produit à la communauté scientifique internationale par ICARE est effective depuis octobre 2013, et nous proposons également une version moyennée sur une grille régulière $1^\circ \times 1^\circ$, proche des résolutions horizontales des modèles de climat, avec une propagation des incertitudes estimées pour les scènes initiales vers la grille $1^\circ \times 1^\circ$. Ce travail supplémentaire sur les données a été fait pour faciliter les comparaisons avec les mailles horizontales régulières des modèles numériques.

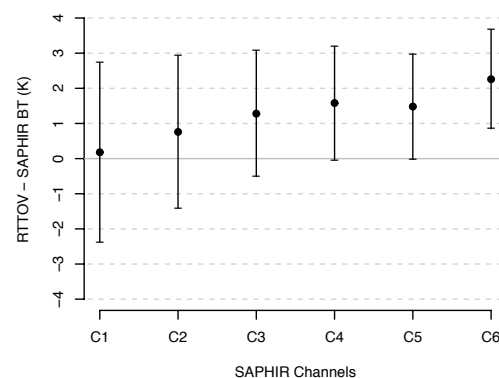
• Evaluation des mesures

La responsabilité de l'instrument allant de pair avec son évaluation après le lancement, nous avons mené un travail de fond sur la collecte de RAOBS tropicaux et « exploitables ». Ce terme « exploitable » est particulièrement important ici car il est essentiel de connaître l'incertitude et la

précision d'une mesure traitée comme une référence de comparaison. Le capteur d'humidité le plus répandu actuellement pour les activités de recherche et de météorologie opérationnelle est le capteur finlandais Vaisala RS92 : 1/3 des mesures sous ballon-sonde se font avec ce type de capteur (catalogue de l'OMM). Ainsi, de nombreuses études documentent sa précision (Miloshevich et al., 2004 & 2006 ; Vömel et al., 2007) et des méthodes de corrections des données ont été développées et éprouvées : le capteur est sujet à (i) un retard de réaction à basse température ($< -45^{\circ}\text{C}$, dans la haute troposphère) qui peut devenir critique lors de variations brutales de l'hygrométrie (à l'entrée et à la sortie d'un cirrus par exemple), à (ii) un assèchement artificiel par chauffage par le soleil, dépendant de la couverture nuageuse et de l'élévation du soleil et à (iii) la procédure d'étalonnage avant le lâcher qui a un impact différent le jour et la nuit.

Ce contexte m'a amené à collaborer avec les membres du réseau international GRUAN (« GCOS - Global Climate Observing System- Reference Upper Air Network », [Dirksen et al., 2014]) dont l'objet est d'établir un réseau pérenne d'observations de la colonne atmosphérique en caractérisant de manière exhaustive les incertitudes de mesure. Cette collaboration a permis d'inclure les RAOBS de Ouagadougou dans la base GRUAN et d'obtenir des profils de RH caractérisés et, le cas échéant, corrigés. A ces RAOBS africains, nous avons inclus les centaines de sondes lâchées pendant l'expérience internationale CINDY/DYNAMO/AMIE[§] (dans la suite C/D/A) qui s'est déroulée dans l'Océan Indien pendant l'hiver 2011/2012. Le lancement de MT ayant eu lieu en octobre 2011, cette campagne était donc la meilleure façon de caractériser le début de vie des instruments. Le travail effectué a nécessité de réaliser un contrôle qualité ayant à notre disposition les mesures brutes issues des RAOBS ce qui s'est fait avec l'aide de R. Johnson et P. Ciesielski (Colorado State University, USA), et une étude des incertitudes associées à la méthode. Les erreurs introduites par le modèle de transfert radiatif utilisé (RTTOV) ont été analysées en partenariat avec V. Payne (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA) et V. O. John (MetOffice, UK), de même que les incertitudes de SAPHIR. Tout ceci a été réalisé dans le cadre plus général du groupe de travail X-CAL coordonné par la NASA dont l'objet est l'intercalibration des radiomètres microondes pour la mission GPM (« Global Precipitation Measurement », NASA/JAXA) et qui utilise SAPHIR pour la calibration des autres radiomètres. Les résultats, dans l'espace de la mesure (i.e. en TBs) ont fait l'objet d'un article (Clain et al., 2015) dont le principal résultat (illustré par la figure 12) est que compte tenu de toutes les incertitudes élémentaires, considérées comme étant non-corrélées, il y a un biais « chaud » dans la modélisation du transfert radiatif (les simulations produisent des TBs plus élevées que celles observées) qui peut être négligé vers le centre de la raie (canaux 1, 2 et 3) mais qui devient significatif vers les ailes (canaux 5 et 6).

FIGURE 12 : Différence moyenne entre les TBs simulées à partir de RAOBS collocalisés avec MT et les TBs fournies par SAPHIR. Les barres verticales correspondent à la somme quadratique des erreurs élémentaires identifiées. Figure tirée de Clain et al. (2015).



[§] « Cooperative Indian Ocean Experiment on Intraseasonal Variability in the Year 2011 »/ « Dynamics of the Madden-Julian Oscillation »/« Atmospheric Radiation Measurement Program Madden-Julian Oscillation Investigation Experiment » dédiée à l'observation de l'oscillation de Madden-Julian. Financement JAMSTEC, NSF, US Dept of Energy, NOAA, Govt Indien.

Ce résultat qui pouvait traduire un problème sur SAPHIR et son étalonnage (qui est monitoré par le CNES depuis le lancement) a conduit en fait à soulever des questions plus fondamentales, et notamment sur la paramétrisation de cette raie d'absorption dans les modèles de transfert radiatif. En effet, les travaux menés au sein du groupe X-CAL sont réalisés sur tous les sondeurs MO similaires à SAPHIR actuellement en opérations : MHS (« Microwave Humidity Sounder », plateformes MetOp), ATMS (« Advances Technology Microwave Sounder », plateforme Suomi-NPP) et SSMI/S (« Special Sensor Microwave Imager/Sounder », plateformes DMSP), et ils montrent que tous ces sondeurs sont en accord entre eux (écart moyen inter-radiomètres $\sim 0,3\text{--}0,7\text{K}$). De plus, la structure du biais constatée se retrouve également à l'examen des écarts entre les observations et les champs simulés par les modèles de prévisions ECMWF et Météo-France (Chambon et al., 2014). Finalement, après quelques participations à des conférences pour présenter et discuter de nos résultats, une émulation s'est créée et a permis de réunir des scientifiques d'une vingtaine d'institutions au cours d'un atelier international spécialement dédié à ce problème[¶]. Cet atelier a permis de réunir, en juin 2015 à Paris, des spécialistes des observations (RAOBS, lidars, GPS et satellites), des experts des processus d'assimilation pour les prévisions numériques, des modélisateurs du transfert radiatif ainsi que des spécialistes de la spectroscopie de cette raie d'absorption. Les discussions ont été particulièrement riches et encourageantes pour la suite car elles ont conduit notamment à mettre en lumière les différences entre la forme supposée de la raie mise dans les bases spectroscopiques et celle observée en laboratoire. Ces écarts entre les modélisations et les observations et l'impact sur l'interprétation du signal ont soulevé le besoin d'échange et de coordination entre les spécialistes instrumentaux/modélisateurs/observateurs. Cet atelier a donné lieu à l'écriture d'un article de type « revue » soumis récemment (Brogniez et al., 2016), après la rédaction de synthèses réalisés auprès de GEWEX (via une newsletter), et des groupes GSICS (« Global Space-based Inter-Calibration System », OMM) et ITWG (« International TOVS Working Group »).

La base de radiosondages a permis d'évaluer la méthode d'estimation des profils de RH (Brogniez et al., 2016) et des FTH (Brogniez et al., 2015). Les résultats, dont un échantillon est proposé sur la figure 13, sont comparables aux méthodes plus « traditionnelles » (c'est ma dénomination, car les approches variationnelles sont très répandues dans la communauté) mises en œuvre pour le traitement des mesures de IASI ou AIRS (mentionnées plus haut) ou multi-spectrales comme l'algorithme NUCAPS (« NOAA Unique CrIS/ATMS Processing System », biais sur l'humidité $< 10\%$ [Nalli et al., 2013]).

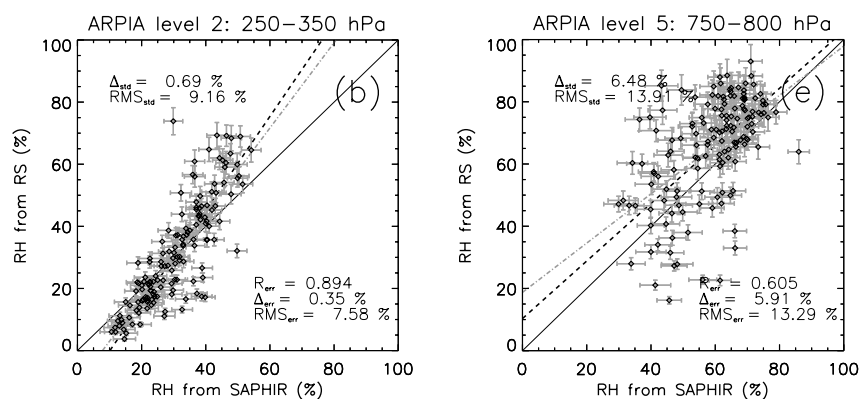


FIGURE 13 : Diagrammes en nuages de points de la valeur de RH telle de fournie par les RAOBS

[¶] Je dois avouer que l'intitulé était tellement précis (« Joint workshop on uncertainties at 183GHz ») qu'il a fait sourire de nombreux collègues de l'IPSL, mais les discussions ont été particulièrement enrichissantes !

en fonction de la valeur de RH estimée à partir de SAPHIR. **(b)** pour la couche 250-350hPa et **(e)** pour la couche 750-800hPa. Les statistiques indiquées tiennent comptes des incertitudes sur x et sur y (méthode bayésienne décrite dans Brogniez et al., acc. 2016).

2.b) Analyse des variations spatiales et temporelles de l'humidité troposphérique

Force est de constater que cette partie est actuellement la moins étoffée de mes activités de recherche, vu l'énergie passée sur les développements des produits dits de « ciel non précipitant » depuis mon intégration dans le groupe mission MT. Et, comme je le précise dans la partie dédiée à mes perspectives de recherche, je projette d'inverser la tendance avec notamment une exploitation renforcée des séries ainsi issues de METEOSAT et de SAPHIR.

La place de l'humidité troposphérique dans le système climatique requiert de s'intéresser aux mécanismes qui influencent sa distribution et sa variabilité, et j'ai donc utilisé des outils dynamiques et statistiques qui permettent d'appréhender ces mécanismes. En complément, je me suis orientée vers l'évaluation des outils de modélisation du climat afin de contribuer à l'évaluation des processus (simples ou complexes) paramétrés dans ces modèles.

2.b.1) Description et analyses de processus

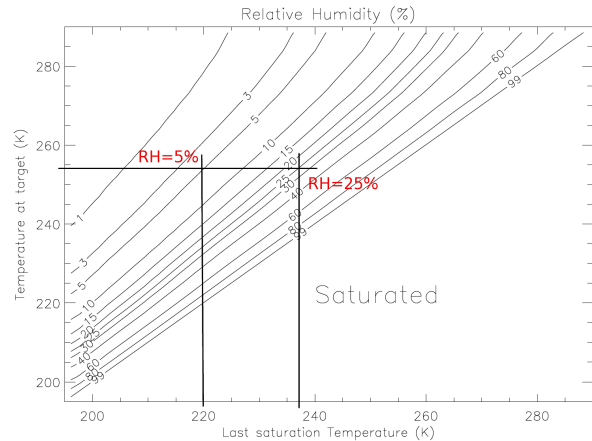
• Dans les zones subtropicales

La mise en évidence de la forte variabilité relative de la FTH des régions subtropicales, comme le montre la figure 8, associée au rôle radiatif de ces zones sèches m'ont amené à m'interroger sur les processus dynamiques mis en jeu. Dans ces régions la distribution de la vapeur d'eau de la troposphère libre peut être en effet reliée très simplement à la dynamique et aux champs de température. On parle alors de contrôle « grande échelle » ou de concept « d'advection-condensation » (Yang & Pierrehumbert, 1994 ; Sherwood, 1996 ; Pierrehumbert, 1998). Cela se résume ainsi : en l'absence de sources et de puits d'humidité, la vapeur d'eau peut être raisonnablement considérée comme un traceur passif non diffusif, et la quantité d'humidité (le rapport de mélange) se conserve tout au long du transport. Ce paradigme permet de déterminer les lieux de dernière saturation des masses d'air (là où le rapport de mélange est le plus faible), et de nombreuses études ont montré la capacité de cette approche à reproduire les observations en se basant sur des champs issus d'analyses ou de ré-analyses météorologiques, ceci pour les zones tropicales (Pierrehumbert & Roca, 1998 ; Galewsky et al., 2005) et pour les moyennes latitudes où la dynamique atmosphérique est essentiellement liée à l'alternance de perturbations baroclines (Brogniez & Pierrehumbert, 2006 ; Montoux et al., 2010). Ainsi, l'humidité relative d'une masse d'air en un lieu donné, en dehors de la couche limite atmosphérique supposée comme la seule source d'humidité, est définie par:

$$RH_{Zone\ d'étude} = \frac{e_s^{Dernière\ saturation}}{e_s^{Zone\ d'étude}} \times \frac{p^{Zone\ d'étude}}{p^{Dernière\ saturation}} \quad (5)$$

La figure 14 traduit cette équation : pour une masse d'air de RH=5% observée dans une zone où la température est de 255K doit avoir une température de dernière saturation de 220K, tandis qu'une masse d'air plus humide de RH=25%, à la même température, est associée à une température de dernière saturation de 237K, c'est-à-dire d'une zone située à plus basse altitude.

FIGURE 14 : Isolignes de RH en fonction de la température du lieu de dernière saturation (abscisse) et de la zone d'étude (ordonnée, « target »). Figure tirée de Sherwood et al. (2010).



Le modèle de rétro-transport lagrangien basé sur ce paradigme et développé par R. T. Pierrehumbert, a été appliqué sur la totalité de la base METEOSAT présentée plus haut afin d'expliquer la variabilité constatée dans l'Est de la Méditerranée pendant la période Juillet-Août (la petite boîte de la figure 8). Ce modèle fournit les coordonnées (lon×lat×pres) de la dernière saturation de masses d'air « lancées » depuis la couche limite saturée, et utilise la méthode de « reverse domain filling » initialement développée pour la stratosphère (Sutton et al., 1994). Il a été utilisé sur les ré-analyses du NCEP (« National Center for Environmental Prediction ») afin de recomposer le champ de RH à 500hPa, qui peut être considérée comme l'isobare la plus représentative de la FTH (discuté dans Brogniez et al., 2009) Ainsi, la composition des 3 années les plus sèches de la période comparée aux 3 années les plus humides permet de dégager deux noyaux de contribution, comme on peut le voir sur la figure 15.

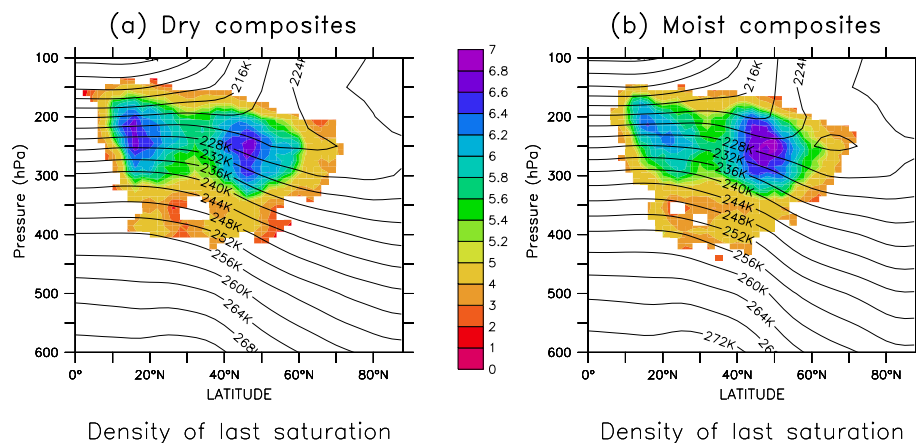
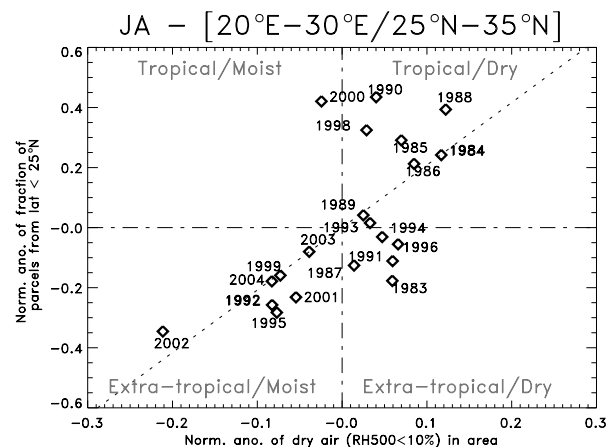


FIGURE 15 : Distributions intégrées en temps et en longitude (échelle log) des coordonnées de dernière la dernière saturation pour (a) les composites sèches et (b) les composites plus humides. Les isothermes sont issues des ré-analyses NCEP moyennées sur les mêmes périodes dans la zone 60°W-40°E. Figure tirée de Brogniez et al. (2009).

Ces deux noyaux sont assez distincts: le premier est tropical (~15°N) et légèrement plus froid (~225K) que le second qui est plutôt extra-tropical (~45°N), avec une prédominance du premier pour les composites sèches. Cela implique que les masses d'air provenant des régions tropicales et transportées vers l'Est de la Méditerranée sont plus sèches que l'équivalent extra-tropical. L'importance relative de ces deux noyaux a été formalisée sur la totalité de la base METEOSAT, et

représentée sur la figure 16 et confirme le rôle du mélange de masses d'air tropicales et extra-tropicales dans la variabilité de la FTH de l'Est de la Méditerranée.

FIGURE 16 : Anomalies normalisées de la proportion de masses d'air venant de latitudes tropicales ($<25^{\circ}\text{N}$) en fonction des anomalies d'air sec dans la zone d'analyse ($\text{RH}<10\%$) sur la période Juillet-Août. Figure tirée de Brogniez et al. (2009).



Bien évidemment ce modèle simple néglige de nombreux processus, discutés dans Pierrehumbert et al. (2006) et Sherwood et al. (2010) et que je résume ici :

- (i) la contribution de l'évaporation des gouttelettes nuageuses qui modifie le niveau de saturation en RH à la sortie de la convection. En effet le concept du modèle d'advection-condensation suppose que le détrainement d'air par la convection est à la saturation alors que les mouvements dans les tours convectives permettent d'être sous la saturation ;
- (ii) les mélanges d'humidité entre masses d'air résultant de mouvements turbulents à des échelles plus petites que la grille de travail. Ces mélanges entre masses d'air sèches et masses d'air humides diluent l'humidité atmosphériques réduisent la possibilité d'avoir de l'air très sec et retardent également la condensation. De plus, lorsque la condensation est atteinte le long d'une trajectoire, le surplus est éliminé par précipitation et est ignoré des autres trajectoires qu'elle peut croiser, alors qu'elle peut contribuer à leur humidification par évaporation lors de la chute.

De nombreuses études utilisant ce paradigme ont discuté ses limites conceptuelles et numériques (la diffusion numérique lisse les extrêmes et les gradients) et proposé des modifications (Dessler & Sherwood, 2000 ; Sherwood & Meyer, 2006 ; Hurley & Galewsky, 2010...). Toutes vont dans le même sens sur la capacité et l'intérêt de ce type d'approche pour analyser la partie sèche du spectre de l'atmosphère tropicale.

C'est d'ailleurs cette partie du spectre, définie comme la fréquence d'occurrence de RH inférieure à 10% (RH_{p10}) que nous avons déterminée sur la période 1983-2004 dans Roca et al. (2012) et que nous avons étendu à la zone tropicale ($30^{\circ}\text{N}/30^{\circ}\text{S}$) afin d'étudier la part significative des influences extra-tropicales dans cette valeur RH_{p10} .

• Dans l'environnement de la convection

La thèse de T. Garot (2013-2016) que je co-encadre avec N. Viltard (LATMOS) porte sur les systèmes convectifs tropicaux et les échanges environnement/convection au cours de leur cycle de vie, en exploitant la synergie des deux radiomètres microondes de Megha-Tropiques, SAPHIR et MADRAS. Pour cela, deux axes sont explorés : (i) la caractérisation de la variabilité de la FTH pendant les différentes phases de l'oscillation de Madden-Julian (MJO), structurant les systèmes convectifs tropicaux de l'Océan Indien et du Pacifique Ouest et leur propagation, pendant les 4

premiers hivers observés par MT (2011-2014), et (ii) la modélisation du cycle de vie d'un cyclone tropical (étude du cyclone Bopha qui s'est développé en mars 2013 dans le bassin Indonésien) via la réalisation de bilans d'eau et de chaleur contraints par les observations (UTHs, RH et taux de pluie estimés à partir de MADRAS [Viltard et al., 2006]).

Le premier axe est spatialement cadré par la campagne C/D/A qui s'est focalisée sur deux zones de $8^\circ \times 8^\circ$ de l'Océan Indien (centré sur l'île de Gan) et qui a conduit à une documentation très poussée de la MJO 2011-2012. Nous avons ainsi considéré séparément les phases de la MJO (convection active ou convection inhibée) en analysant l'origine des masses d'air, c'est-à-dire en exploitant le concept de coordonnées de dernière saturation, en parallèle avec les classes nuageuses issues des analyses des observations des plateformes géostationnaires (principalement MTSAT) et projetées dans les pixels d'observations de SAPHIR (Sèze et al., 2015). Cette approche permet de caractériser les deux situations (convection active ou inhibée) en termes d'advection de grande échelle et de processus locaux liés à la couverture nuageuse, et d'étudier leurs relations avec la variabilité observée de l'humidité troposphérique.

La figure 17 illustre parfaitement l'approche suivie avec Thomas : il s'agit d'étudier l'évolution de la distribution de l'humidité troposphérique (dans le cas présenté ici UTH du canal 3 de SAPHIR) via les paramètres statistiques (moyenne, mode, skewness et kurtosis).

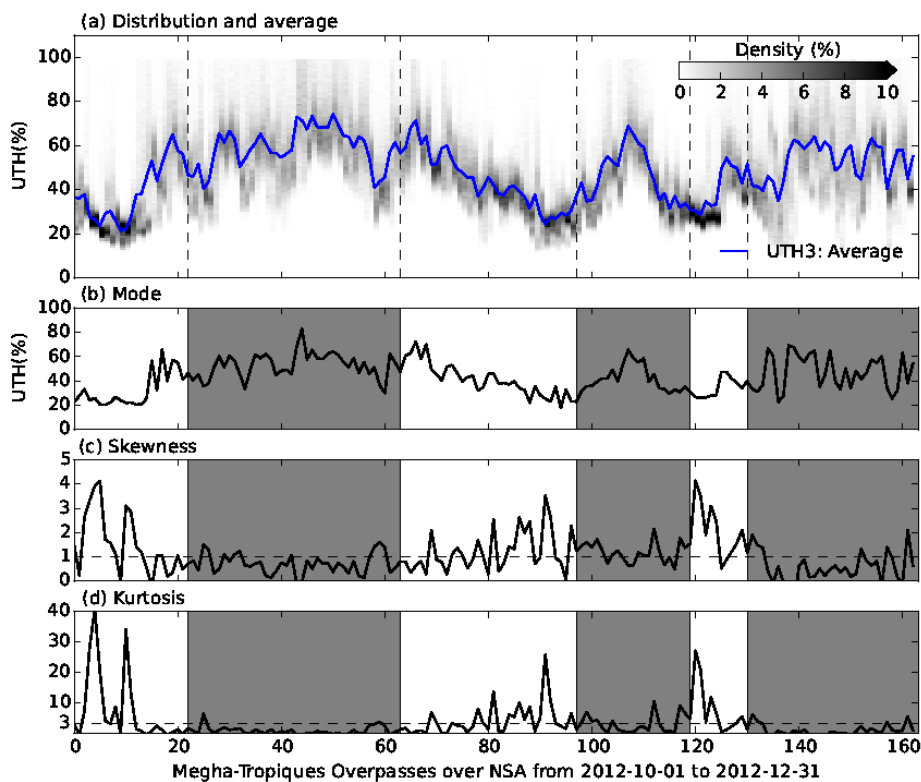


FIGURE 17 : Evolution des moments de la distribution de l'UTH3 (canal $183,31 \pm 2,8$ GHz) observée par SAPHIR d'octobre à décembre 2012 dans la zone « nord » de C/D/A (0° - 8° N/ 79° E- 80° E) (a) moyenne, (b) mode, (c) skewness (« asymétrie ») et (d) kurtosis (« aplatissement »). Les phases actives/inhibées sont en gris/blanc. Figure tirée de Garot et al. (en prep. 2016).

On voit nettement une asymétrie de la distribution qui se crée pendant les périodes inhibées de la MJO, avec un déplacement du mode de la distribution vers les faibles valeurs d'humidité et un pic plus prononcé. A contrario, la distribution retrouve systématiquement une loi Gaussienne en phase

active. La relation statistique (il est difficile de faire une analyses de processus avec une approche eulérienne) avec le type nuageux est menée via les corrélations simples entre ces paramètres et les occurrences nuageuses.

Le second axe propose un suivi lagrangien d'un cyclone et la réalisation d'un bilan énergétique complet avec la réalisation d'un modèle de cycle de vie. En effet, les équations de conservation de bilan de la masse permettent de traduire l'impact de la convection sur son environnement, en terme d'échange d'humidité :

$$\frac{\partial \langle q \rangle}{\partial t} + \langle \nabla \cdot q \vec{v} \rangle = \bar{E} - \overline{P_{surf}} \quad (6)$$

où q est l'humidité spécifique, \vec{v} est le vecteur vent horizontal, E est le flux d'évaporation à la surface et P_{surf} est le taux de pluie à la surface. Les termes en $\langle \dots \rangle$ dénotent l'intégrale verticale (coordonnées de pression, depuis la surface jusqu'à la tropopause), tandis que les termes $\overline{\dots}$ sont les moyennes horizontales, sur le domaine d'étude. L'approche que nous suivons consiste à estimer la plupart de ces termes à partir des profils d'humidité et du taux de pluie issus de SAPHIR et MADRAS. Ces analyses sont encore à finaliser et formaliser dans le cadre de la thèse de Thomas, mais le modèle obtenu sur le cyclone Bopha est prometteur.

2.b.2) Evaluation de modèles de climat

Comme que je le précise plus haut, j'ai dès le début de mes activités de recherche transposé et adapté mes analyses des observations au monde de la modélisation du climat, via la méthode dite « modèle-vers-satellite » (Morcrette, 1991) qui consiste à reproduire les observations satellitaires à partir des grandeurs issues des modèles atmosphériques et d'un modèle de transfert radiatif adapté aux bandes spectrales concernées pour obtenir la fonction de sensibilité instrumentale (6,3 μ m et 183GHz, RTTOV). La même méthode d'estimation de FTH est appliquée sur champs de TBs issus des modèles afin d'avoir deux grandeurs comparables. Les deux bases de données (IR et MO) ont été utilisées pour la bande tropicale.

J'ai tout d'abord exploité l'archive METEOSAT pour évaluer 14 modèles de climat participants à l'exercice AMIP (« Atmospheric Model Intercomparison Project », à l'époque de ma thèse (2001-2004) cela concernait l'exercice AMIP-2). L'une des analyses portait sur cette région de l'Est de la Méditerranée pour laquelle nous avons mis en lumière l'importance du mélange latéral dans la variabilité de FTH (figure 18).

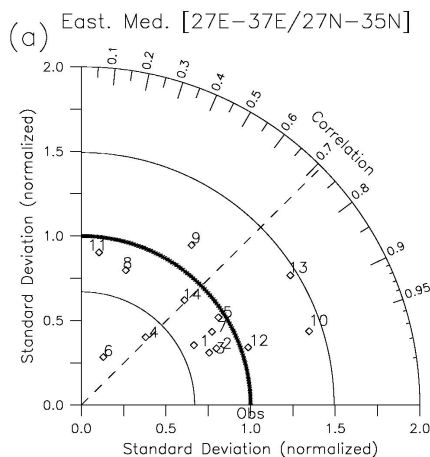


FIGURE 18 : Diagramme de Taylor décrivant le cycle saisonnier moyen de la FTH dans l'Est de la Méditerranée pour chacun des 14 modèles (repérés par un numéro). Dans ce type de diagramme polaire, l'angle et le rayon représentent respectivement le coefficient de corrélation aux observations et l'écart-type normalisé. Les modèles les plus performants sur ce test sont ceux qui se rapprochent le plus de la référence « obs ». Figure tirée de Brogniez et al. (2005).

Bien évidemment, les modèles évalués dans cette analyse ont tous évolué, et il est donc impensable de tirer des conclusions définitives, mais on peut clairement stipuler deux choses : d'une part l'intérêt de ce type d'approche (qui est maintenant largement répandue pour l'évaluation des modèles numériques [Bodas-Salcedo et al., 2011 ; Reverdy et al., 2015]) est indéniable car, en l'occurrence, des modèles ayant des caractéristiques différentes (résolutions verticale & horizontale, paramétrisations physiques) peuvent néanmoins produire des champs de FTH de même variabilité interannuelle, et d'autre part (dans ce le cas illustré ici) que cette variabilité interannuelle qui s'explique par du mélange latéral permet de diagnostiquer d'éventuelles divergences dans la simulation de la dynamique de grande échelle.

J'ai également analysé les exercices de sensibilité à la concentration en CO₂ (quadruplement : 4×CO₂) en termes d'effet sur la modification de la FTH, selon des classements en régimes dynamiques (Brogniez & Pierrehumbert, 2007) ou selon sa distribution régionale (Pierrehumbert et al. 2006). Je fais le choix ici de revenir sur la décomposition en régimes dynamiques car les analyses effectuées par P. Sinigog, dont la thèse est en cours et que je co-encadre avec L. Picon (LMD), se basent en partie sur cet outil.

La décomposition de l'atmosphère tropicale en régimes dynamiques a été proposée par Bony et al. (2004) : il s'agit de considérer l'occurrence des situations de régimes de vitesse verticale à 500hPa, ω_{500} , prise comme signature de la circulation atmosphérique tropicale, et d'étudier les perturbations induites par une modification du climat sur la FTH d'un régime ω_{500} donné (ascendance, subsidence). En effet, une modification du climat provoquée par un forçage quelconque est associée à des changements de la dynamique (les fréquences d'occurrence δP des régimes ω_{500} changent, terme de gauche de l'éq. 7), à des changements de la thermodynamique décorrélés de la circulation (comme des modifications du gradient vertical de température cumulées dans δFTH , terme du centre de l'éq. 7) et à des termes croisés ($\delta P \delta FTH$, terme de droite de l'éq. 7) :

$$\delta FTH = \int_{-\infty}^{+\infty} FTH_{\omega} \delta P_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} \delta FTH_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} \delta FTH_{\omega} \delta P_{\omega} d\omega \quad (7)$$

Cette décomposition peut s'appliquer indifféremment aux données de références (par exemple la FTH issue des observations IR de METEOSAT ou MO de AMSU-B, associée à la moyenne de ω_{500} provenant des ré-analyses NCEP et ECMWF -ERA40 ou ERA-Interim-) ainsi qu'aux champs dynamiques et thermodynamiques issus de modèles. Ainsi, dans Brogniez et Pierrehumbert (2007) nous avons examiné 4 modèles de climat, deux d'entre eux proposant des simulations à 4×CO₂. Alors que les modèles ont tous des écarts aux observations (plus ou moins forts) différents selon les régimes ω_{500} considérés, les comportements sous forçage climatique étaient sensiblement les mêmes, à savoir un maintien de la FTH à une valeur à peu près constante alors que le forçage imposé se traduit par un léger affaiblissement de la circulation de grande échelle (plus de régimes modérés, moins de régimes extrêmes [Bony et al., 2004 ; Wyant et al., 2006]). Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse de maintien de l'humidité relative atmosphérique à une valeur constante lors d'une modification climatique (Held & Soden, 2000).

Une partie du travail de P. Sinigog, étudiant en thèse depuis 2014, consiste d'ailleurs à évaluer l'impact la paramétrisation de la physique du modèle LMDZ sur la distribution de la FTH, tout en explorant la climatologie METEOSAT et l'évolution de la FTH selon les régimes dynamiques.

3) Perspectives scientifiques

Les projets de recherche que je souhaite poursuivre à court et moyen terme sont bien évidemment dans la lignée des travaux que j'ai résumé plus haut. Néanmoins le travail de longue haleine mené sur la préparation de la mission Megha-Tropiques et sur les développements algorithmiques doit permettre de contribuer à des analyses de processus, objectifs ultimes de ces travaux et actions.

Ainsi, je compte renforcer les deux axes que j'ai creusé jusqu'à présent, avec toutefois une inversion des priorités : le premier est associé à l'estimation de la vapeur d'eau avec l'idée sous-jacente d'améliorer la méthodologie de caractérisation des incertitudes (toujours dans une approche probabiliste) et le second concerne les processus et la contrainte supplémentaire apportée par les observations pour améliorer leur compréhension. Pour ces deux axes, je propose une séparation « court terme/long terme » que je sais par avance fictive. Néanmoins cette séparation reflète bien les priorités que je souhaite sur ces prochains travaux.

3.a) Concernant l'observation de la vapeur d'eau : algo et instruments

3.a.1) A court terme : amélioration de la méthode ARPIA

C'est l'aspect probabiliste de l'algorithme ARPIA qui a été développé jusqu'à présent et les comparaisons sur des profils de RH mesurés par RAOBS laissent de la place à des améliorations. De mon point de vue ces améliorations sont nécessaires pour pouvoir exploiter les données SAPHIR avec confiance. Il s'agit concrètement de reprendre la collaboration avec P-E Kirstetter (National Severe Storms Laboratory, NOAA, USA) qui avait été initiée lors de son séjour au LATMOS en 2008-2010 et qui avait donné lieu à la mise en œuvre de l'approche « GAMLSS » sur SAPHIR.

Ces améliorations nécessitent de reprendre la définition de la méthode actuelle: en effet, nous avons pris comme hypothèse que la relation **TB**-RH suit une loi de distribution Gaussienne alors que le cadre GAMLSS permet d'avoir accès aux 4 moments des distributions : la position, la forme et l'échelle (i.e. moyenne, kurtosis et skewness). Plusieurs formes sont à tester, comme les lois Gamma ou Beta et celles-ci devraient permettre de prendre en compte les relations non-centrées pour avoir des estimations plus robustes, tant en terme de « meilleure estimation » que d'incertitude.

Ce remaniement de la définition statistique sera associé à un travail sur la base d'entraînement synthétique. J'avais pris le parti d'éviter de faire cet apprentissage sur des profils issus de réanalyses, telles NCEP ou ERA, pour privilégier les vraies observations telles que celles de la base ARSA. Néanmoins mes travaux sur l'évaluation de SAPHIR m'ont amenés à remettre en question la qualité de données collectées. Ces données sont qualifiées et corrigées (voire éliminées) de manière rigoureuse par l'équipe ABC(t) du LMD qui la maintient, mais les RAOBS eux-mêmes sont sujets à de nombreux questionnement quant à leur cohérence (entre capteurs notamment). C'est d'ailleurs tout l'enjeu du réseau GRUAN que j'ai évoqué plus haut : la mise en cohérence des réseaux d'observation et de mesure de l'atmosphère. Il sera donc intéressant de tester la pertinence d'un entraînement statistique sur une base constituée de profils issus de ré-analyses, comme les sous-bases ECMWF qui sont des échantillonnages représentatifs des atmosphères ECMWF: cette base aurait l'avantage d'être de qualité homogène spatialement et temporellement.

De même, les méthodes statistiques entraînées sur données synthétiques introduisent des écarts qui peuvent être corrigés *a posteriori* par des approches statistiques astucieuses. J'envisage par exemple de tester une méthode d'ajustement des quantiles des distributions : celle-ci consiste à associer les quantiles d'une distribution « estimée » à ceux de la distribution de « contrôle » et d'ajuster la relation quantile-quantile. De cette façon les ajustements sont réalisés selon la probabilité

d'occurrence afin de tenir compte de la différence des distributions. Cette méthode d'ajustement des CDF (« Cumulative Distribution Function ») a ainsi été utilisée par Nuret et al. (2008) pour corriger les mesures obtenues par deux capteurs de RAOBS utilisés pendant la campagne AMMA (« African Monsoon Multidisciplinary Analyses »), et elle a été plus récemment associée à des approches de descente d'échelle de climat régional par Colette et al. (2012).

Pour avancer concrètement sur ce projet, je vais proposer ces méthodologies probablement lors du prochain appel à projet du comité TOSCA du CNES (dans le projet MT) ou à celui du PNTS de l'INSU, en collaboration avec P-E Kirstetter. Son financement permettrait de le réaliser rapidement et dans de bonnes conditions.

3.a.2) A moyen terme : couplage avec les données de l'A-Train

Il me paraît également essentiel d'exploiter la synergie des observations par satellite de l'atmosphère tropicale afin de renforcer la description des processus liant vapeur d'eau, nuages, précipitations et dynamique. En effet, la formation des nuages, leur déploiement vertical ainsi que leur cycle de vie résulte d'interactions complexes mettant en jeu l'environnement clair, les échanges radiatifs (ondes longues et ondes courtes) et la dynamique atmosphérique, depuis la turbulence de petite échelle jusqu'aux cellules de circulation de grande échelle.

Il s'agirait donc de combiner les observations MT/A-Train (plus particulièrement celles de son lidar Caliop sur CALIPSO et de son radar CPR sur CloudSat) afin de proposer une meilleure caractérisation des processus thermodynamiques et radiatifs liés à la convection, précipitante ou non, formée de glace d'eau liquide ou des deux, et depuis son initiation jusqu'à sa dissipation. La contrainte dynamique pourrait être également appréhendée avec les perspectives de mesures du vent offertes par le lidar vent Aladin/ADM-Aeolus (ESA) dont le lancement est prévu pour 2017.

La combinaison Megha-Tropiques/A-Train/ADM-Aeolus nécessite un travail essentiel de projection des observations, en espace et en temps avec un besoin de prise en compte des échelles et de la géométrie de chaque instrument. Les différentes échelles de mesures vont en effet de $\sim 40 \times 40 \text{ km}^2$ (instrument ScaRaB) à une empreinte de 90 m de diamètre (lidar Caliop) : la synergie des mesures doit ainsi tenir compte des différentes échelles de mesure et y répondre permettra de faire progresser les questions scientifiques abordées. Ainsi les méthodes statistiques de montée/descente d'échelle, traditionnellement utilisées pour la modélisation du climat et pour autant jamais appliquées à la synergie de données spatiales devraient idéalement faire partie des outils à mettre en place.

La base de données ainsi obtenue permettra de réaliser des analyses selon des régimes radiatifs, dynamiques et nuageux pertinents, caractérisant la bande tropicale et de répondre à des questions concernant la rétroaction de ces différents éléments des systèmes nuageux, centraux au cycle de l'eau atmosphérique.

Un projet allant dans ce sens, co-proposé avec H. Chepfer (LMD) et impliquant des collègues de l'IPSL et des membres des équipes scientifiques de l'A-Train, a été récemment proposé au département Sciences de la Planète et de l'Univers de l'IDEX Paris-Saclay dans le cadre de l'Appel à Manifestation d'Intérêt pour les Initiatives de Recherche Stratégique.

3.a.3) A plus long terme : les futures observations de la vapeur d'eau

Les perspectives de plus long terme sont directement liées aux programmes d'observation de la Terre et du cycle de l'eau atmosphérique.

• Exploitation de MetOp-Second Generation

L'horizon de l'observation de la vapeur d'eau atmosphérique est limité et il s'arrête actuellement aux satellites MetOp-Seconde Generation (CNES & EUMETSAT) : en plus de l'interféromètre IR IASI-New Generation, deux radiomètres microondes MWS (« Microwave Sounder », balayage perpendiculaire, plateforme MetOp-SG-A 2021) et MWI (« Microwave Imager », balayage conique, plateforme MetOp-SG-B 2022) sont prévus. Ceux-ci proposent chacun 5 canaux d'observations dans la raie à 183GHz, et qui sont légèrement décalés (cf la Table 1).

- MWS - Canal d'observation (GHz)	Sensibilité radiométrique prévue $Ne\Delta T$ (K)	- MWI - Canal d'observation (GHz)	Sensibilité radiométrique prévue $Ne\Delta T$ (K)
$183,31 \pm 1,0$	0,7	$183,31 \pm 2,0$	1,2
$183,31 \pm 1,8$	0,5	$183,31 \pm 3,4$	1,1
$183,31 \pm 3,0$	0,5	$183,31 \pm 4,9$	1,1
$183,31 \pm 4,5$	0,35	$183,31 \pm 6,1$	1,1
$183,31 \pm 7,0$	0,35	$183,31 \pm 7,0$	1,0

TABLE 1 : Spécifications des instruments MWS (MetOp-SG-A) et MWI (MetOp-SG-B), avec les sensibilités radiométriques prévues.

Ainsi la combinaison de ces 2 radiomètres pourrait fournir des contraintes plus fortes sur les estimations de profils d'humidité relative, et cela mérite d'être analysé. Ce travail nécessite des collaborations externes dans la mesure où les caractéristiques précises des orbites des deux satellites A et B ne sont pas encore définies et que le modèle de transfert radiatif que j'utilise abondamment (RTTOV) ne permet pas de tester des configurations instrumentales (celles-ci sont pré-établies dans des tables, générées par le NWP-SAF). C'est dans ce cadre que je vais renforcer ma collaboration avec S. Buehler (Universität Hamburg, Allemagne), avec lequel j'ai travaillé sur les biais constatés à 183GHz ainsi que dans un projet de 18 mois financé par l'ESA et dont l'objectif était de tester l'intérêt (bruits et résultats attendus) d'un sondeur MO de type SAPHIR sur une plateforme géostationnaire. Il a participé au développement d'un modèle de transfert radiatif dit « raie-par-raie » ARTS (« The Atmospheric Radiative Transfer Simulator ») qui permet d'aller jusqu'à la spécification des fonctions de filtre instrumentales et cet outil sera idéal pour la réalisation de tests réalistes, incluant les bruits théoriques.

• Perspectives « H_2O »

Des réflexions récentes au sein de la communauté scientifique (voir notamment les conclusions du « Climate Symposium », de Darmstadt en 2014) en terme de compréhension de processus et d'analyses de tendances ont clairement identifiés les besoins en observation. Ainsi la disponibilité importante de mesures d'humidité localisées en moyenne troposphère (~500-600hPa), que ce soit dans le domaine IR (~6,3 μ m) ou le domaine MO (183,31GHz) rend les prévisions numériques du temps, et leur analyses, plus robustes. A contrario, il existe clairement des trous d'information et de documentation au niveau de la tropopause et de la basse troposphère : dans ces deux cas les forts gradients posent des problèmes de précision des mesures. Au niveau de la tropopause il faut tenir compte des concentrations relativement plus élevées dans la haute troposphère et les concentrations très faibles par comparaison dans la basse stratosphère. Dans la basse troposphère, dans et juste au-dessus de la couche limite (depuis la surface jusque 700hPa environ), la

thermodynamique est directement affectée par les échanges d'humidité et de chaleur avec la surface. Une progression dans la compréhension des processus du cycle de l'eau repose clairement sur la capacité à mesurer (avec la tracabilité des incertitudes et erreurs) des profils verticaux caractérisés par de forts gradients : il y a typiquement 5 ordres de grandeurs entre la surface et la basse stratosphère.

Les analyses de sensibilité climatique nécessitent des données thermodynamiques précises et denses surtout quand les nuages et les précipitations entrent en jeu puisque leurs effets sont liés au gradient adiabatique humide et à la convergence d'humidité à la base des systèmes convectifs (Trenberth et al., 2003). Ainsi, les profils thermodynamiques observés permettant de valider (ou d'invalider) les modèles dédiés au climat ou à la turbulence de petite échelle doivent au moins résoudre verticalement le gradient de la couche limite atmosphérique. Des simulations ont par exemple montré que, dans les basses couches, la modification des gradients verticaux d'humidité modifie la force et la durée de vie des cellules orageuses (Crook, 1996).

Ces échelles sont difficilement atteintes avec la technologie actuelle, mais atteindre une meilleure résolution verticale que celle obtenue aujourd'hui (2-4km pour les sondeurs passifs, IR et MO ; jusqu'à 300m pour les lidars types DIAL « Differential Absorption Lidar ») permettra en outre de tenter de répondre aux questions associées à la rétroaction des nuages bas (liés au mélange convectif des basses couches), ou à l'organisation de la convection dépendante de l'interaction entre zones sèches, nuages bas et circulation des basses couches (Bony et al., 2015)

C'est donc là qu'il est essentiel de surmonter des challenges technologiques concernant les mesures d'un profil vertical d'humidité précis et résolvant les gradients. Le dernier appel à idées du CNES, en 2013, a amené à la création en 2014 d'un groupe de réflexion auquel je participe, sur les besoins en observation de la vapeur d'eau, que ce soit en termes de processus, de climat, ou de prévision numérique. La phase 0 a ainsi été initiée en janvier 2016, et plusieurs pistes sont à l'étude. Sur ce sujet, il me paraît évident que le meilleur moyen d'avoir une nouvelle mission dédiée « H₂O » est de se rapprocher de la NASA : les travaux qu'ils ont lancés sur les lidars incluent des études « vapeur d'eau » (A. Nehrir, NASA, discussion informelle) et un travail collaboratif est clairement une piste à envisager.

3.b) Concernant l'analyse des processus

3.a.1) A court et moyen termes

- **Environnement-convection**

Les prochains mois vont bien évidemment être dédiés à la finalisation des analyses réalisées avec T. Garot autour des processus impliqués dans la variabilité de l'humidité pendant les phases de la MJO et du modèle de bilan d'humidité lagrangien qu'il développe sur les cyclones tropicaux. Les fortes corrélations obtenues entre l'augmentation de l'humidité et l'occurrence de nuages élevés (convection profonde, enclumes, les cirrus étant dans une classe à part) et illustrée sur la figure 19 sont cohérentes avec les études précédentes (Nicholls et al., 1988 ; Soden & Fu, 1995 ; Sherwood & Wahrlich, 1999) : la RH de la moyenne à haute troposphère favorise le développement de la convection, et les mouvements convectifs humidifient par transport et entraînement la haute troposphère. L'intérêt ici vient dans la séparation des phases actives et inhibées de la MJO puisque lors des phases actives la troposphère est humidifiée de manière quasi uniforme, tandis qu'en phase inhibée on voit apparaître un gradient vertical.

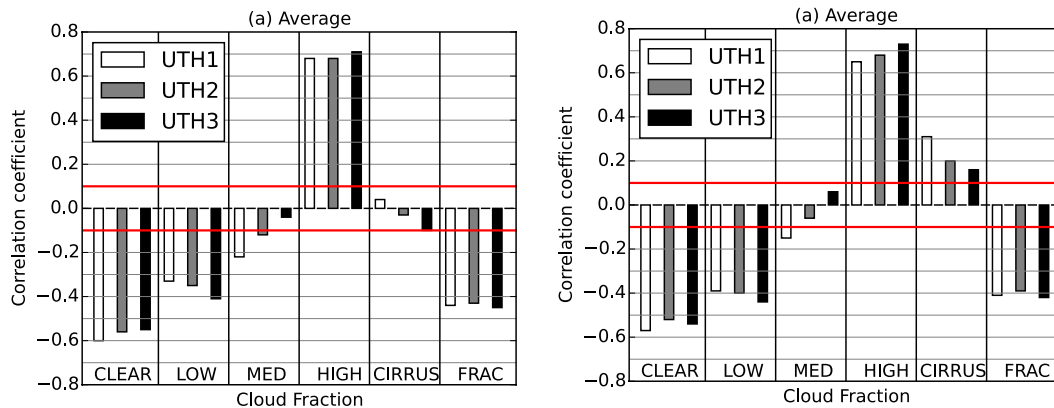


FIGURE 19 : Corrélations temporelles entre les estimations des UTHs de SAPHIR ($UTH1 \sim 183,31 \pm 0,2 \text{ GHz}$; $UTH2 \sim 183,31 \pm 1,1 \text{ GHz}$; $UTH3 \sim 183,31 \pm 2,8 \text{ GHz}$: depuis 200hPa jusque 500hPa environ) et les occurrences des classes nuageuses observées dans la zone « Nord » de C/D/A. **(gauche)** phases actives et **(droite)** phases inhibées, avec un traitement des 4 années 2011-2014. Les traits rouges indiquent le seuil de significativité. Figure tirée de Garot et al. (en prép 2016).

De même, alors qu'en phase active nos analyses ne présentent quasiment aucune relation entre l'occurrence des nuages cirriformes et les variations d'UTH, il semble qu'un signal se dégage en phase inhibée. L'analyse proposée par Sherwood (1999) soutient la déshydratation de la troposphère pour la maintenance de cirrus pas trop épais optiquement, ceux-ci pompant la vapeur d'eau de la colonne, hypothèse renforcée par certains modèles (Fueglistaler & Baker, 2006). La discussion menée ici ne concerne que la moyenne des distributions, alors qu'on voit parfaitement que cette grandeur n'a aucun sens en phase inhibée. C'est pour cela que les analyses ont été complétées par les moments d'ordre supérieur des distributions des UTHs, avec une décomposition de la classe cirriforme, et un couplage avec les origines de dernière saturation des masses d'air.

• Evaluation des modèles LMDZ, ARPEGE-climat et ARPEGE-prévi

Dans le cadre de la mission MT, SAPHIR a été rapidement assimilé dans les modèles de prévision ARPEGE et ALADIN, qui ont révélé des améliorations sur le champ d'humidité prévu, principalement au-dessus de 400hPa (Chambon et al., 2014). P. Chambon, J-M Piriou F. Duruisseau (CNRM) et moi avons entamé une comparaison entre les profils de RH issus de SAPHIR avec les champs de RH produits par ARPEGE dans l'objectif de diagnostiquer l'un et l'autre, des modifications sur le schéma de convection d'ARPEGE ayant été récemment implémentées. Pour atteindre cet objectif nous avons par exemple prévu d'exploiter les mesures par RAOBS réalisées à Ouagadougou, à l'été 2012 : sur 24 passages de MT observés nous avons lâchés 2 ballons-sonde à 30 min d'écart afin d'avoir, pour chacun des passages, 2 profils décalés dans le temps (et donc verticalement) et synchronisés avec le passage du satellite.

Les travaux autour de la campagne C/D/A réalisés avec T. Garot nous ont amené à évaluer le modèle LMDZ, et 2 paramétrisations différentes (« 5A »=ancienne physique et « 5B »=nouvelle physique), ainsi que le modèle ARPEGE-climat, ces deux modèles ayant été testés en version 1-D sur les zones de C/D/A avec un forçage des analyses ECMWF dans le grand domaine. La figure 20 donne une illustration de ce qui a été fait avec Thomas sur le sujet. Celle-ci montre bien la très bonne cohérence entre SAPHIR, les RAOBS de la campagne et les champs issus de ERA-Interim (les RAOBS de la campagne ont été assimilés par le modèle IFS de l'ECMWF), ainsi que les

différences entre les deux versions de LMDZ qui présentent toutefois toutes les deux une assez bonne représentation des phases convectives et inhibées de la période. La version du modèle ARPEGE testée dans cet exercice présente une sous-estimation de l'humidification par la convection, surtout en période active.

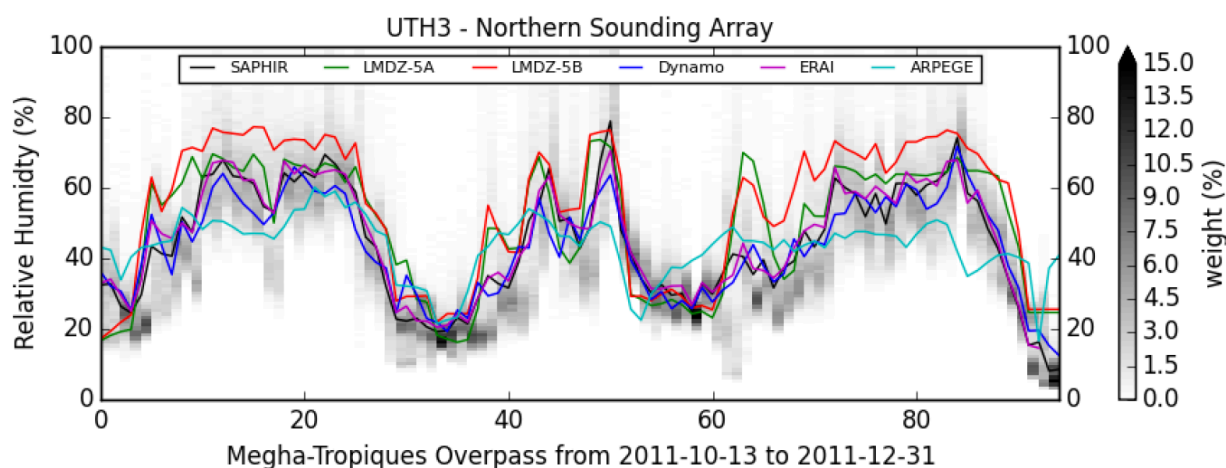


FIGURE 20 : Evolution de l'UTH3 (canal $183,31 \pm 2,8 \text{ GHz}$) sur la période octobre-décembre 2011 dans la zone « nord » de C/D/A, observée par SAPHIR (densité en nuances de gris), observée par les RAOBS de la campagne (bleu), issue de ERA-Interim (rose), issue de LMDZ-5A (vert) et LMDZ-5B (rouge) et issue de ARPEGE-climat (cyan).

C'est un exercice d'évaluation difficile compte tenu des paramétrisations sous-jacentes (pour la convection) de ces modèles, mais il devrait permettre de mieux cerner les processus pertinents à l'échelle du modèle. A moyen terme, il est prévu d'examiner les versions 3-D ce qui implique que cette fois les champs d'humidité produits seront issus de leur propre dynamique. Les statistiques d'origines de dernière saturation ainsi que les liens avec la nébulosité réalisées sur les observations donneront clairement des diagnostics pertinents pour évaluer les modèles, à la fois en terme de dynamique et de convection.

La thèse de P. Sinigoj est quant à elle totalement tournée vers LMDZ et l'analyse de la variabilité interannuelle de la FTH, en suivant l'approche des régimes dynamiques appliqués aux moments de la loi de distribution avec 3 questions : (1) peut-on détecter dans les observations climatiques de l'humidité relative troposphérique (~ 25 ans de METEOSAT) une amplification du cycle de l'eau atmosphérique (la troposphère tropicale deviendrait plus humide, la troposphère subtropicale deviendrait plus sèche) ainsi que proposé par Held & Soden (2006) à partir des analyses des modèles CMIP4 ? (2) De plus, observe-t-on une évolution conjointe de l'OLR (observations CERES/NOAA) ? (3) Et si tel est le cas, ces tendances sont-elles constatées, selon les mêmes régimes radiatifs ou dynamiques dans le modèle LMDZ ?

La première année de la thèse de Peter a été consacrée à l'analyse des 25 années de FTH METEOSAT et aux comparaisons avec les champs issus de LMDZ, en forçant ou non la dynamique du modèle avec la dynamique ERA-Interim, et en se restreignant aux zones de subsidence de grande échelle ($\omega_{500} > 20 \text{ hPa/j}$). Les premiers résultats, dont une illustration est donnée sur la figure 21, montrent l'intérêt d'étudier en parallèle tous les moments de la distribution de FTH, qui est particulièrement piquée (proche d'une loi Gamma) dans les zones sèches : alors que la variabilité interannuelle de la moyenne de la FTH est relativement proche des observations, la dissymétrie observée des distributions n'est pas vraiment représentée dans le modèle.

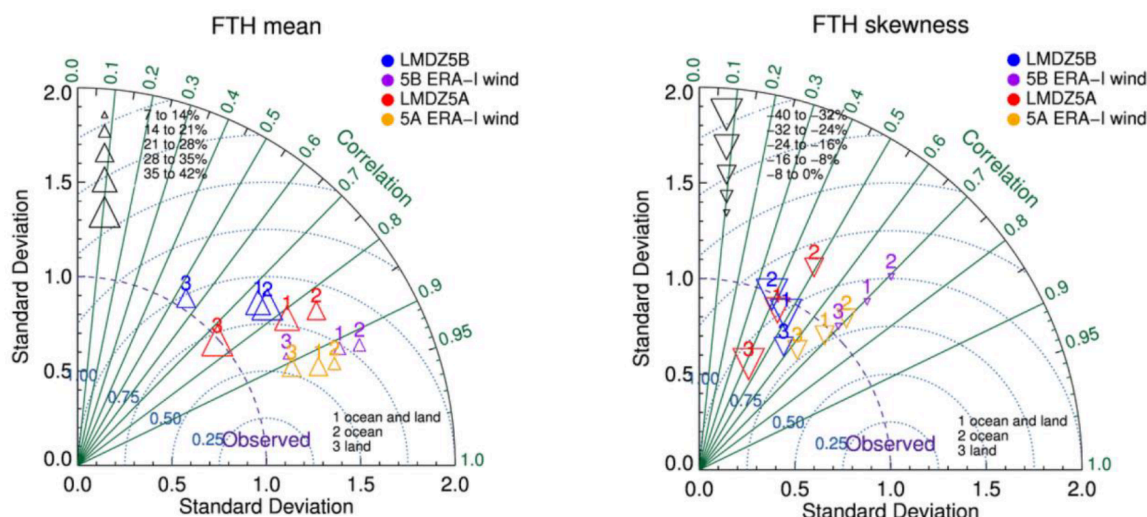


FIGURE 21 : Diagrammes de Taylor (cf la figure 18) pour (**gauche**) la moyenne et (**droite**) le skewness des FTH de la période 1984-2009 de la zone METEOSAT (45°S-45°N/45°O-45°E). Les simulations avec le label « ERA-I wind » signifient que les vents ERA-Interim sont utilisés à la place des vents que produirait le modèle. Seules les subsidences de grande échelle ($\omega_{500} > 20\text{hPa/j}$) sont considérées.

Ces résultats très prometteurs doivent être étoffés dans les prochains mois avec la mise en place de diagnostics radiatifs et dynamiques complémentaires, pertinents pour le modèle.

• Compréhension des processus associés à la sécheresse en Afrique de l'Ouest

Enfin, je suis impliquée dans l'ANR « Alerte aux Canicules au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé » (ACASIS) portée par S. Janicot (IRD/LOCEAN) et qui a démarré en avril 2014. Au sein de cette ANR, je suis impliquée dans la Tâche 3 : « *Heat waves over West Africa : characterization, historical and future evolution, predictability and forecast* » (portée par B. Pohl, CNRS/CRC), avec pour objectifs plus précis d'analyser les téléconnexions possibles et les relations de cause à effet entre le déclenchement d'une vague de chaleur en surface (puisque une vague de chaleur est finalement reliée à une sorte d'indice de confort en surface) avec des régions plus ou moins proches (telles la Méditerranée – cadre HyMEX- ou les moussons d'Asie). C'est un travail que j'ai débuté en 2015 avec S. Bastin (LATMOS) pour lequel nous avons décidé de croiser les rétro-trajectoires lagrangiennes du modèle évoqué plus haut avec des simulations issues du modèle de prévision météorologique de méso-échelle WRF (« Weather Research and Forecasting »), dans l'objectif d'évaluer ces téléconnexions. Ces analyses ont débuté via un stage de Master 2 (J. Perraud, printemps-été 2015) qui nous a permis de mieux comprendre la partie « rétro-trajectoires » en nous appuyant sur les champs de vent et de température issus des réanalyses ERA-Interim. Alors que les vagues de chaleur au Sahel se déclenchent préférentiellement au printemps et à l'automne, nous nous sommes concentrés sur les printemps de la période 1979-2014.

Ainsi les collègues du LTHE impliqués dans ACASIS ont établis en amont un indice de chaleur, calculé de manière empirique à partir de la température et de l'humidité à 2 m, ainsi qu'une définition d'une vague de chaleur (période d'au moins 3 jours pendant lesquels l'indice de chaleur est supérieur à un seuil). Ces définitions nous ont permis de cibler quelques années tests, les plus contrastées en terme de quantités de vagues de chaleur au sein d'une même saison. Le travail de J. Perraud a consisté à réaliser de nombreux tests de rétro-trajectoires. La figure 21 montre ainsi les résultats contrastés d'origine de dernière saturation pour le printemps 1998, détecté comme une période importante en terme de durée des vagues de chaleur.

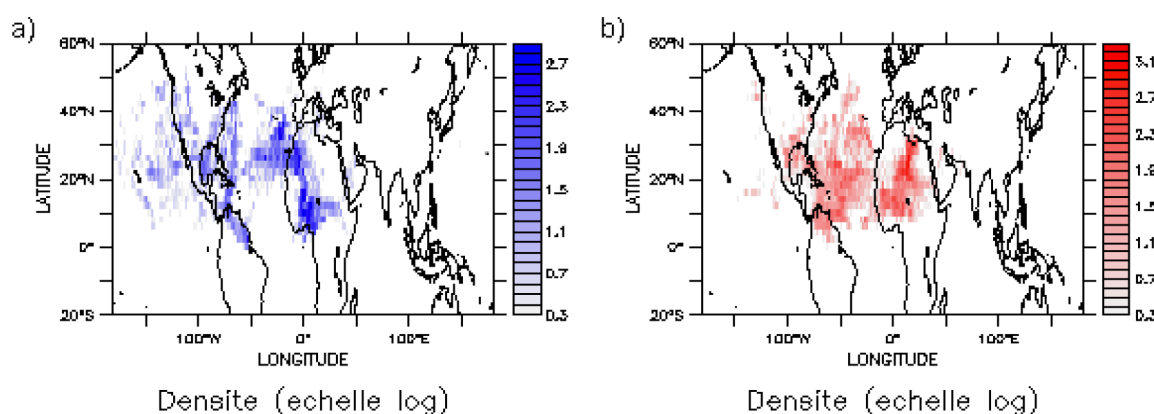


FIGURE 21 : Diagrammes de densité (échelle log) des coordonnées de dernière saturation pour (a) mi-avril 1998 (fort indice de chaleur) et (b) fin mai 1998 (faible indice de chaleur), pour des masses d'air arrivant dans la région Sahélienne (10°W-10°E/5°N-15°N).

C'est une piste qui semble prometteuse car elle montre clairement deux principaux canaux influençant l'humidité de la moyenne troposphère du Sahel. Il faut maintenant finaliser, généraliser et croiser avec les simulations WRF, en collaboration avec les membres de la Tâche 3 de ACASIS.

3.a.2) A plus long terme

Il est évident que l'exploitation des observations de SAPHIR n'en est qu'à ses débuts, et de nombreuses possibilités d'exploitations sont envisageables, pour des phénomènes convectifs pas forcément précipitants.

Deux sujets ont ma préférence.

- **Cycle diurne de la vapeur d'eau**

Le premier thème concerne le cycle diurne de la vapeur d'eau des régions tropicales qui est intimement lié à la convection. Ainsi, les travaux de Soden (2000) ont rappelé la corrélation forte entre la variation de la couverture nuageuse (convection profonde) à l'échelle journalière et les variations de l'UTH, un décalage temporel entre les maxima étant clairement établi (2h sur terre, 12h sur océan). De nombreux travaux déroulent ce lien, et je souhaite creuser plus amplement les possibilités offertes par l'orbite originale de SAPHIR pour analyser ce cycle diurne et sa variabilité spatiale. Je me focaliserai sur les zones de nuages bas de type stratocumulus ($P_{\text{sommet}} > 750\text{hPa}$ ou $< 3\text{km}$) qui se développent principalement sur les bord Est des bassins océaniques tropicaux et qui sont généralement associés à de fortes subsidences atmosphériques liées à la circulation de grande échelle. Ils occupent une place importante dans la détermination des termes de la sensibilité climatique car ils ont un faible effet de serre (car peu de contraste avec la température de la mer) ainsi qu'un fort effet parasol (Hartmann & Short, 1980). Ces nuages ont un cycle diurne prononcé qui a récemment été étudié par l'intermédiaire des observations CloudSat/Caliop et de trajectoires lagangiennes (Eastman & Wood, 2016).

Une piste envisagée serait d'estimer, à partir des profils de RH et de vents issus de réanalyses, des tendances de variations de la vapeur d'eau. Ce sont de récentes discussions avec B. Mapes (Univ. of Miami) qui ont ouvert la possibilité de combler les trous laissés par MT grâce à une technique d'advection et de composites assez attrayante (Wimmers & Velden, 2011). Nous proposerons très probablement un projet dans ce sens au Programme National de Télédétection Spatiale, cette année ou l'année prochaine.

- **Convection peu profonde & profonde**

Le second thème concerne le cycle de vie des nuages tropicaux et l'interaction avec leur environnement, dont un schéma présentant le couplage complexe est visible sur la figure 22. C'est un thème que j'ai commencé à creuser pendant l'encadrement de T. Garot, et qui prend de l'importance au regard des « Grand Challenges » portés par le WCRP. En dehors de l'aspect plutôt attirant d'un regroupement de la communauté internationale autour de questions particulières (Bony et al., 2015), certaines des questions soulevées nécessitent d'exploiter les observations satellites et de tirer parti de la synergie des instruments actuellement disponibles.

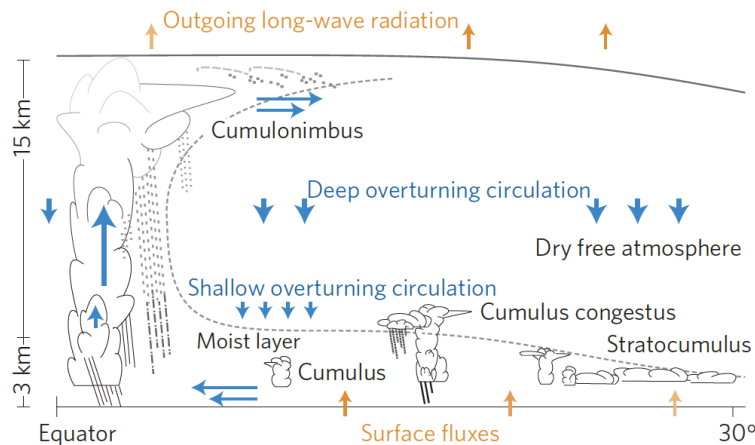


FIGURE 22 : Schéma représentant les couplages entre la vapeur d'eau, la dynamique de grande échelle, le rayonnement et les flux de surface. Figure tirée de Bony et al. (2015).

Concernant les nuages bas, de récentes hypothèses émises par Sherwood et al. (2014) notamment, mettent en avant le rôle de l'intensité du mélange convectif (lié à la température de surface) entre la couche limite atmosphérique et la moyenne troposphère au-dessus qui pourrait assécher les plus basses couches et, en retour, réduire la couverture nuageuse. Les paramètres influençant la couverture spatiale de ces nuages sont : le mélange convectif peu profond (« shallow convection », qui assèche la couche limite et augmente l'évaporation de surface), le dégagement de chaleur associé à la convection (qui stabilise la couche limite et diminue l'évaporation en surface) et le refroidissement radiatif (idem) (Vial et al., subm. 2016). Ces mécanismes, assez intéressants, car pouvant renforcer encore plus la sensibilité climatique ont cependant été mis en évidence seulement à partir de quelques mesures par RAOBS dans la zone Indo-Pacifique et des champs issus de réanalyses (ERA-Interim entre autres), ce qui appelle une analyse plus large d'observations. D'un autre côté, de nombreuses études basées sur des simulations produites par des modèles plus ou moins simples (des modèles « carrés » idéalisés ou modèle de circulation générale sans rotation) uniquement contraints par l'équilibre radiatif-convectif montrent une aggrégation spontanée des cellules convectives individuelles en un seul cluster organisé, assemblage qui serait favorisé par une température de surface de mer élevée (Muller & Held, 2012 ; Mauritsen & Stevens, 2015). Dans ces modèles, l'aggrégation spontanée conduit à un équilibre entre des régions sèches, associées à un fort refroidissement radiatif, autour d'une zone beaucoup plus humide dans laquelle se concentre le cluster.

Ces quelques questions relatives à la convection posent celle de l'utilisation des observations pour confirmer ou infirmer ces hypothèses issues de la modélisation numérique idéalisée. A l'heure actuelle, nous disposons de données (dont la synergie est de mon point de vue largement sous-exploitée) qui devraient permettre d'apporter quelques éléments de réponse.

Ainsi il est évident que la combinaison Megha-Tropiques/Caliop-CALIPSO/CPR-CloudSat peut contribuer aux réflexions sur les échanges entre les régions sèches subtropicales et les nuages, et

l'importance de ces échanges. J'ai d'ailleurs proposé un sujet de thèse en ce sens à l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France (en co-direction avec S. Bony, LMD), thèse qui donnerait, si elle est pourvue, une excellente opportunité de montrer l'apport des observations par satellite de la vapeur d'eau pour mener des analyses de processus.

LISTE DES ACRONYMES

ACASIS	Alerte aux Canicules au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé
AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
AMIE	Atmospheric Radiation Measurement Program Madden–Julian Oscillation Investigation Experiment
AMIP	Atmospheric Models Intercomparison Project
AMSU-B	Advanced Microwave Sounder Unit - B
ARPEGE	Action de Petite Echelle - Grande Echelle
ARPIA	Atmospheric Relative humidity Profile Including Analysis of confidence intervals
ARSA	Analyzed RadioSoundings Archive
ARTS	The Atmospheric Radiative Transfer Simulator
ASECNA	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder
CALIOP-CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization - Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
C/D/A	CINDY/DYNAMO/AMIE
CERES	Cloud and the Earth's Radiant Energy System
CPR-CloudSat	Cloud Profiling Radar / Cloud Satellite
CMIP	Climate Models Intercomparison Project
CM-SAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CINDY	Cooperative Indian Ocean Experiment on Intraseasonal Variability in the Year 2011
DIAL	Differential Absorption Lidar
DYNAMO	Dynamics of the Madden-Julian Oscillation
ECMWF	European Center for Medium-range Weather Forecasts
ERA-Interim	ECMWF Re-Analysis Interim
ERC	Equilibre Radiatif Convectif
ESA	European Space Agency
FTH/UTH	Free/Upper Tropospheric Humidity
GEWEX	Global Energy and Water Experiment
G-VAP	GEWEX-Water Vapor Assessment
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GRUAN	GCOS -Global Climate Observing System- Reference Upper Air Network
GSICS	Global Space-based Inter-Calibration System
HyMEX	Hydrological cycle in the Mediteranean EXperiment
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge
ICARE	Cloud-Aerosol-Water-Radiation Interactions
IFS	Integrated Forecasting System
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IR	InfraRouge
MADRAS	Microwave Analysis and Detection of Rain and Atmospheric Structures
MJO	Madden-Julian Oscillation
MO	Micro-Onde
MT	Megha-Tropiques
MVIRI/SEVIRI	METEOSAT Visible and InfraRed Imager / Spining Enhanced Visible and InfraRed Imager
MWI/MWS	MicroWave Imager / MicroWave Sounder
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
NUCAPS	NOAA Unique CrIS/ATMS Processing System

NWP-SAF	Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction
OLR	Outgoing Longwave Radiation
RAOBS	RADiosounding OBServations
RH	Relative Humidity
RTTOVS	Radiative Transfer for TOVS - Television Infrared Observation Satellite (TIROS) Operational Vertical Sounder
SAPHIR	Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Intertropical par Radiométrie
ScaRaB	Scanner for Radiation Budget
TB	Température de Brillance
WCRP	World Climate Research Program
WRF	Weather Research and Forecasting

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- #Aires F., F. Bernardo, H. Brogniez and C. Prigent (2010) An innovative calibration method for the inversion of satellite observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 2458–2473, 2010, doi:10.1175/2010JAMC2435.1
- Allan R. (2012). The role of water vapour in Earth's energy flows. *Surv. Geophys.* 33, 557-564, doi:10.1007/s10712-011-9157-8
- Allan R., K. Shine, A. Slingo and J. Pamment (1999) The dependence of clear-sky outgoing longwave radiation on surface temperature and relative humidity. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 2103-2126.
- Andersson E., P. Bauer, A. Beljaars, F. Chevallier, E. Holm, M. Janiskova, P. Kallberg, G. Kelly, P. Lopez, A. MacNally, E. Moreau, A. Simmons, J-N. Thepaut and A. Tompkins (2005) Assimilation and modeling of the atmospheric hydrological cycle in the ECMWF forecasting system. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 86, 387-402, doi:10.1175/BAMS-86-3-387.
- Blackwell W. and F. Chen (2006) Neural network retrieval of atmospheric temperature and moisture profiles from AIRS/AMSU data in the presence of clouds. In *Proc. of SPIE*, vol 6233, 62331E-1, doi:10.1117/12.664712.
- Bodas-Salcedo A. M. Webb, S. Bony, H. Chepfer, J-L. Dufresne, S. Klein, Y. Zhang, R. Marchand, J. Haynes, R. Pincus and V. John (2011) COSP : Satellite simulation software for model assessment. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 92, 1023-1043, doi :10.1175/2011BAMS2856.1.
- Bony S., B. Stevens, D. Frierson, C. Jakob, M. Kageyama, R. Pincus, T. Shepherd, S. Sherwood, A. Siebesma, A. Sobel, M. Watanabe and M. Webb (2015) Clouds circulation and climate sensitivity, *Nature Geoscience*, 8, 261-268, doi :10.1038/ngeo2398.
- Bony S., J-L Dufresne and H. Le Treut (2004) On the dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Clim. Dyn.*, 22, 71-86., doi :10.1007/s00382-003-0369-6.
- Bréon F-M, D. Jackson and J. Bates (2000) Calibration of the Meteosat water vapor channel using collocated NOAA/HIRS-12 measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 11,925-11,933.
- #Brogniez H., G. Clain and R. Roca (2015) Validation of Upper Tropospheric Humidity from SAPHIR onboard Megha-Tropiques using tropical soundings. *J. Appl. Meteorol. Climat.*, doi:10.1175/JAMC-D-14-0096.1
- #Brogniez H., P.E. Kirstetter and L. Eymard (2011) Expected improvements in the atmospheric humidity profile retrieval using the Megha-Tropiques microwave payload. *Quat. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.1869.
- #Brogniez H., R. Roca and L. Picon (2009) A Study of the Free Tropospheric Humidity Interannual Variability Using Meteosat Data and an Advection-Condensation Transport Model. *J. Clim.* 22, 6773-6787.
- #Brogniez H. and R. Pierrehumbert (2007) Intercomparison of tropical tropospheric humidity in GCMs with AMSU-B water vapor data. *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi :10.1029/2006GL029118.
- #Brogniez H. and R. Pierrehumbert (2006) Using microwave observations to assess large-scale control of free tropospheric water vapor in the mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi :10.1029/2006GL026240.
- #Brogniez H., R. Roca and L. Picon (2005) Evaluation of the tropical free tropospheric humidity in AMIP-2 simulations using METEOSAT water vapor channel data. *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi :10.1029/2005GL024341.
- #Brogniez H., R. Roca and L. Picon (2004) Interannual and intraseasonal variabilities of the Free Tropospheric Humidity using METEOSAT Water Vapor channel over the Tropics. *Proceeding of the 2004 Eumetsat Meteorological Satellite Conference*, Prague, Czech Republic, 31 May-4 June.
- #Brogniez H. (2004) Humidité de la troposphère libre africaine : Elaboration d'une archive METEOSAT, climatique et évaluation de modèles, PhD thesis, Univ. Pierre et Marie Curie.
- Capderou M (2009) Sampling, comparison with other Meteorological satellites, in *Megha-Tropiques Technical Memorandum*, vol 1, march 2009.
- Chambon P., L-F Meunier, F. Guillaume, J-M Piriou, R. Roca and J-F. Mahfouf (2014) Investigating the impact of the water vapour sounding observations from SAPHIR onboard Megha-Tropiques for the ARPEGE global model. *Quat. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi :10.1002/qj.2478.
- #Clain G., H. Brogniez, V. Payne, V. John and M. Luo (2015) An assessment of SAPHIR calibration using

- quality tropical soundings. J. Atmos. Oceanic Technol., 32 (1), pp.61-78, doi:11.1175/JTECH-D-14-00054.1
- Crook, N. A. (1996) Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields, Mon. Weather Rev., 124, 1767-1785.
- Colette A., R. Vautard and M. Vrac (2012) Regional climate downscaling with prior statistical correction of the global climate forcing. Geophys. Res. Lett., 39, doi :10.1029/2012GL052258.
- Desbois M., M. Capderou, L. Eymard, R. Roca, N. Viltard, M. Viollier and N. Karouche (2007) Megha-Tropiques : un satellite hydrométéorologique franco-indien. La Météorologie, 57, 19-27.
- Dessler A. and S. Sherwood (2000) Simulations of tropical upper tropospheric humidity. J. Geophys. Res., 105, 20,155-20,163.
- Dirksen, R. J., M. Sommer, F. J. Immler, D. F. Hurst, R. Kivi, and H. Vömel (2014) Reference upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde. Atmos. Meas. Tech., 7, 4463-4490, doi:10.5194/amt-7-4463-2014.
- Eastman R. and R. Wood (2016) Factors controlling low-cloud evolution over the Eastern subtropical oceans : a lagrangian perspective using the A-Train satellites. J. Atmos. Sci., 73, 331-351, doi :10.1175/JAS-D-15.0193.1.
- Eymard L., M. Gheudin, P. Laborie, F. Sirou, C. Le Gac, J-P Vinson, S. Franquet, M. Desbois, F. Karbou, R. Roca, N. Scott and P. Waldteufel (2002) The SAPHIR humidity sounder. Notes des Activités Instrumentales de l'IPSL, 24 (août 2002), ISSN 1626-8334.
- Fu Q., M. Baker and D. Hartmann (2002) Tropical cirrus and water vapor : an effective Earth infrared iris feedback ? Atmos. Chem. Phys., 2, 31-37.
- Fueglistaler S. and M. Baker (2006) A modelling study of the impact of cirrus clouds on the moisture budget of the upper troposphere. Atmos. Chem. Phys., 6, 1425-1434.
- Galewsky J., A. Sobel and I. Held. (2005) Diagnosis of subtropical humidity dynamics using tracers of last saturation. J. Atmos. Sci. 62, 3353-3367.
- Gleick P. (1996) Water ressources. In *Encyclopedia of climate and weather*, Oxford Univ. Press., pp 817-823.
- Greenwald T. and S. Christopher (2002) Effect of cold clouds on satellite measurements near 183GHz. J. Geophys. Res., 107, doi : 10.1029/2000JD000258.
- Hartmann D. and S. Short (1980) On the use of Earth radiation budget statistics for studies of clouds and climate. J. Atmos. Sci., 37,1233-1250.
- Held I. and B. Soden (2000) Water vapour feedback and global warming. Annu. Rev. Energy Environn. 25, 441-475.
- Held I. and B. Soden (2006) Robust responses of the hydrological cycle to global warming. J. Clim., 19, 3354-3360.
- Hong G., G. Heygster, J. Miao and K. Kunzi (2005) Sensitivity of microwave brightness temperatures to hydrometeors in a tropical deep convective cloud system at 89-190GHz. Radio. Sci., 40, doi : 10.1029/2004RS003129.
- Hurley J. and J. Galewsky (2010) A last saturation diagnosis of subtropical water vapor response to global warming. Geophys. Res. Lett., 37, doi :10.1029/2009GL042316.
- Isaacs R. and G. Deblonde (1987) Millimeter wave moisture sounding : the effect of clouds. Radio. Sci., 22, 367-377.
- John V. and B. Soden (2006) Does convectively-detained cloud ice enhance water vapor feedback? Geophys. Res. Lett., 33, L20701, doi:10.1029/2006GL027260.
- Lerner J., E. Weisz and G. Kirchengast (2002) Temperature and humidity retrieval from simulated Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) measurements. J. Geophys. Res., 107, doi : 10.1029/2001JD900254.
- Lindzen R., M-D Chou and A. Hou (2001) Does the Earth have an adaptive infrared iris ? Bull. Am. Meteor. Soc., 82, 417-432.
- Liu Q. and F. Weng (2005) One-dimensional variational retrieval algorithm of temperature, water vapor and cloud water profiles from Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., 43, 1087-1095.
- Manabe S. and R. Wetherald (1967) Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. J. Atmos. Sci., 24 (3), 241-259.
- Mathur A., R. Gangwar, B. Gohil, S. Deb, P. Kumar, M. Shukla, B. Simon and P. Pal (2013) Humidity profile retrieval from SAPHIR onboard the Megha-Tropiques. Curr. Sci., 104, 1650-1655.

- Mauritsen T. and B. Stevens (2015) Missing iris effect as a possible cause of muted hydrological change and high climate sensitivity in models. *Nat. Geosci.*, 8, doi:10.1038/ngeo2414.
- Miloshevich L., A. Paukkunen, H. Vömel and S. Oltmans (2004) Development and validation of a time lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 1305-1327.
- Miloshevich L., H. Vömel, D. Whiteman, B. Lesht, F. Schmidlin and F. Russo (2006) Absolute accuracy of water vapor measurements from six operational radiosonde types launched during AWEX-G and implications for AIRS validation. *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JD006083.
- #Montoux N., P. Keckhut, A. Hauchecorne, J. Jumelet, H. Brogniez and C. David (2010) Isentropic modeling of a cirrus cloud event observed in the mid-latitude UTLS. *J. Geophys. Res.*, 115, D2, doi:10.1029/2009JD011981.
- Morcrette J-J (1991) Evaluation of model-generated cloudiness : satellite observed and modelgenerated diurnal variability of brightness temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1205–1224.
- Muller C., and I. Held (2012) Detailed investigation of the self-aggregation of convection in cloud-resolving simulations. *J. Atmos. Sci.*, 69, 2551-2565, doi:10.1175/JAS-D-11-0257.1
- Nalli N., C. Barnet, A. Reale, D. Tobin, A. Gambacorta,, E. Maddy, E. Joseph, B. Sun, L. Borg, A. Mollner, V. Morris, X. Liu, M. Divarkala, P. Minnett, R. Knuteson, T. King and W. Wolf (2013) Validation of satellite sounder environmental data records : application to the Cross-track Infrared Microwave Sounder Suite. *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/2013JD020436.
- Nicholls M., R. Johnson and W. Cotton (1988) The sensitivity of two-dimensional simulations of tropical squall lines to environmental profiles., *J. Atmos. Sci.*, 45, 3526-3649.
- Nuret M., J-P Lafore, O. Bock, F. Guichard, A. Augusti-Panareda, J-B N’Gamini and J-L Redelsperger (2008) Correction of humidity bias for Vaisala RS80-A sondes during the AMMA 2006 observing period. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 2152-2158.
- O’Gorman P. and C. Muller (2010) How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations ? *Environ. Res. Lett.*, 5, doi:10.1088/1748-9326/5/2/025207.
- Peixoto J. and A. Oort (1996) The climatology of relative humidity in the atmosphere. *J. Clim.*, 9, 3443-3463.
- Picon L., S. Fongang, G. Sèze and M. Desbois (1995) African and Atlantic short-term climatic variations described from METEOSAT water vapor channel. *Ann. Geophys.*, 13, 768-781.
- Picon L., R. Roca, S. Serrar, J-L Monge and M. Desbois (2003) A new METEOSAT « water vapor » archive for climate studies. *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JD002640.
- Pierrehumbert R. (2011) Infrared radiation and planetary temperature. *Physics Today* 64, 33-38, doi:10.1063/1.3541943.
- #Pierrehumbert R., H. Brogniez and R. Roca (2006) On the relative humidity of the Earth’s atmosphere. Dans *The global circulation of the Atmosphere*, T. Schneider and A. Sobel eds. Princeton University Press.
- Pierrehumbert R. and R. Roca (1998) Evidence for control of Atlantic subtropical humidity by large scale advection. *Geophys. Res. Lett.* 25, 4537-4540.
- Pierrehumbert R. (1998) Lateral mixing as a source of subtropical water vapor. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 151-154.
- Pierrehumbert R. (1995) Thermostats, radiator fins and the local runaway greenhouse. *J. Atmos. Sci.*, 52 (10), 1784-1806.
- Poitou, J. (2013) Composition atmosphérique et bilan radiatif. *Reflets de la Physique*, 33, 28-33.
- PougatchevN., T. August, X. Calbet, T. Hultberg, O. Oduleye, P. Schlusser, B. Stiller, K. St Germain and G. Bingham (2009) IASI temperature and water vapor retrievals - error assessment and validation. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6453-6458.
- Ramond D., H. Corbin, M. Desbois, G. Szejwach and P. Waldteufel (1981) The dynamics of polar jet streams as depicted by the METEOSAT WV channel radiance field. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2164–2176.
- Raval A. and V. Ramanathan (1989) Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*, 342, 758-761.
- Reverdy M., H. Chepfer, D. Donovan, V. Noel, G. Cesana, C. Hoareau, M. Chiriaco and S. Bastin (2015) An EarthCARE/ATLID simulator to evaluate cloud description in climate models. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2015JD023919.

- #Roca R., Guzman, J., Lemond, J., Meijers, L., Picon and H. Brogniez (2012) Tropical and extra-tropical influences on the distribution of free tropospheric humidity over the intertropical belt. *Survey in Geophysics*, doi:10.1007/s10712-011-9169-4.
- Roca R., J-P. Lafore, C. Piriou and J-L Redelsperger (2005) Extratropical dry-air intrusions into the West African Monsoon midtroposphere: an important factor for the convective activity over the Sahel. *J. Atmos. Sci.* 62, 390-407.
- Rossow W. and R. Schiffer (1991) ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 2-20.
- Saunders R., T. Hewison, S. Stringer and N. Atkinson (1995) The radiometric characterization of AMSU-B. *IEEE Trans. Micro. Theory Techn.*, 43, 760-771.
- Schaerer G. and T. Wilheit (1979) A passive microwave technique for profiling of atmospheric water vapor. *Radio. Sci.*, 14, 371-375.
- #Schroder M., R. Roca, L. Picon, A. Kniffka and H. Brogniez (2015) Climatology of free tropospheric humidity: extension to the SEVIRI era, evaluation and exemplary analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 11,129-11,148, doi:10.5194/acp-14-11129-2014.
- Sherwood S., S. Bony and J-L Dufresne (2014) Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, 505, 37-42, doi :10.1038/nature12829.
- Sherwood S., R. Roca, T. Weckwerth and N. Andronova (2010) Tropospheric water vapor, convection and climate. *Rev. Geophys.* 48, doi:10.1029/2009RG000301.
- Sherwood S. and C. Meyer (2006) The general circulation and robust relative humidity. *J. Clim.*, 19, 6267-6277.
- Sherwood S. and R. Wahrlich (1999) Observed evolution of tropical deep convective events and their environment, *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1777-1795.
- Sherwood S. (1999) On moistening of the tropical troposphere by cirrus clouds. *J. Geophys. Res.*, 104, 11,949-11,960.
- Sherwood S. (1996) Maintenance of the free-tropospheric tropical water vapor distribution. Part 2 : simulation by large-scale advection. *J. Clim.*, 9, 2919-2934.
- #Sivira R., H. Brogniez, C. Mallet and Y. Oussar (2015) A layer-averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations : design and results for the from Megha-Tropiques payload. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 1055-1071, doi:10.5194/amt-8-1055-2015.
- Soden B. and R. Fu (1995) A satellite analysis of deep convection, upper tropospheric humidity and the greenhouse effect. *J. Clim.*, 8, 2333-2351.
- Soden B. and C. Bretherton (1993) Upper tropospheric relative humidity from the GOES 6.7 μ m channel : method and climatology for July 1987. *J. Geophys. Res.*, 98, 16,669-16,688.
- Spencer R. and W. Braswell (1997) How dry is the tropical free troposphere? Implications for a global warming theory. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 78, 1097-1106.
- Stephens G., J. Li, M. Wild, C. Clayson, N. Loeb, S. Kato, T. L'Ecuyer, P. Stackhouse, M. Lebsock and T. Andrews (2012) An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, 5, 691-696, doi :10.1038/ngeo1580.
- Stephens G., D. Jackson and I. Wittmeyer (1996) Global observations of upper tropospheric water vapor derived from TOVS radiance data. *J. Climate*, 9, 305-326.
- Stephens G. and S. Tjemkes (1993) Water vapour and its role in the Earth's Greenhouse. *Aust. J. Phys.*, 46, 149-166.
- Stephens, G. and T. Greenwald (1991) The Earth's radiation budget and its relation to atmospheric hydrology. 1. Observations of the clear sky greenhouse effect. *J. Geophys. Res.*, 96, 15,311-15,324.
- Stevens B. and S. Bony (2013) Water in the atmosphere. *Physics Today*, 66, 29-34, doi:10.1063/PT.3.2009.
- Su H., W. Read, J. Jiang, J. Waters, D. Wu and E. Fetzer (2006) Enhanced positive water vapor feedback associated with tropical deep convection : new evidence from Aura MLS. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi :10.1029/2005GL025505.
- Sutton R., H. Maclean, R. Swinbank, A. O'Neill and F. Taylor (1994) High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using lagrangian trajectory calculations. *J. Atmos. Sci.*, 51, 2995-3005.
- Trenberth K., A. Dai, R. Rasmussen and D. Parsons (2003) The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 84, 1205-1217, doi :10.1175/BAMS-84-9-1205.
- Vial J., et al (2016) Coupling between lower-tropospheric convective mixing and low-level clouds : physical mechanisms and dependence on convection scheme. *Subm to J. Adv. Model. Earth Syst.*

- Viltard N. C. Burlaud and C. Kummerow (2006) Rain retrieval from TMI brightness temperature measurements using a TRMM PR-based database. *J. App. Meteorol. Climat.*, 45, 455-466.
- Vömel, H., H. Selkirk, L. Milosevich, J. Valverde-Canossa, J. Valdés, E. Kyrö, R. Kivi, W. Stolz, G. Peng, and J. A. Diaz (2007) Radiation Dry Bias of the Vaisala RS92 Humidity Sensor, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*, 24, 953-963, doi: 10.1175/JTECH2019.1.
- Wang J., J. King, T. Wilheit, G. Szejwach, L. Gesell, R. Nieman, D. Niver, B. Krupp and J. Gagliano (1983) Profiling atmospheric water vapor by microwave radiometry. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, 779-788.
- Wentz F. and M. Schabel (2000) Precise climate mmonitoring using complementary satellite data sets. *Nature*, 403, 414-416.
- Wilheit T. and A. Al Khalaf (1994) A simplified interpretation of the radiances from SSM/T-2. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 54, 203-212.
- Wimmers A. and C. Velden (2011) Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1024-1036.
- Wing A. and K. Emmanuel (2014) Physical mechanisms controlling self-aggregation of convection in idealized numerical modeling simulations. *J. Adv. Model. Earth. Syst.*, 6, 59-74, doi:10.1002/2013MS000269.
- Wyant M., C. Bretherton, J. Bacmeister, J. Kiehl, I. Held, M. Zhao, S. Klein and B. Soden (2006) A comparison of low-latitude cloud properties and their response to climate change in three AGCMs sorted into regimes using mid-tropospheric vertical velocity. *Clim. Dyn.*, 27, 261-279.
- Yang H. and R. Pierrehumbert (1994) Production of dry air by isentropic mixing. *J. Atmos. Sci.*, 51 (23), 3437-3454.